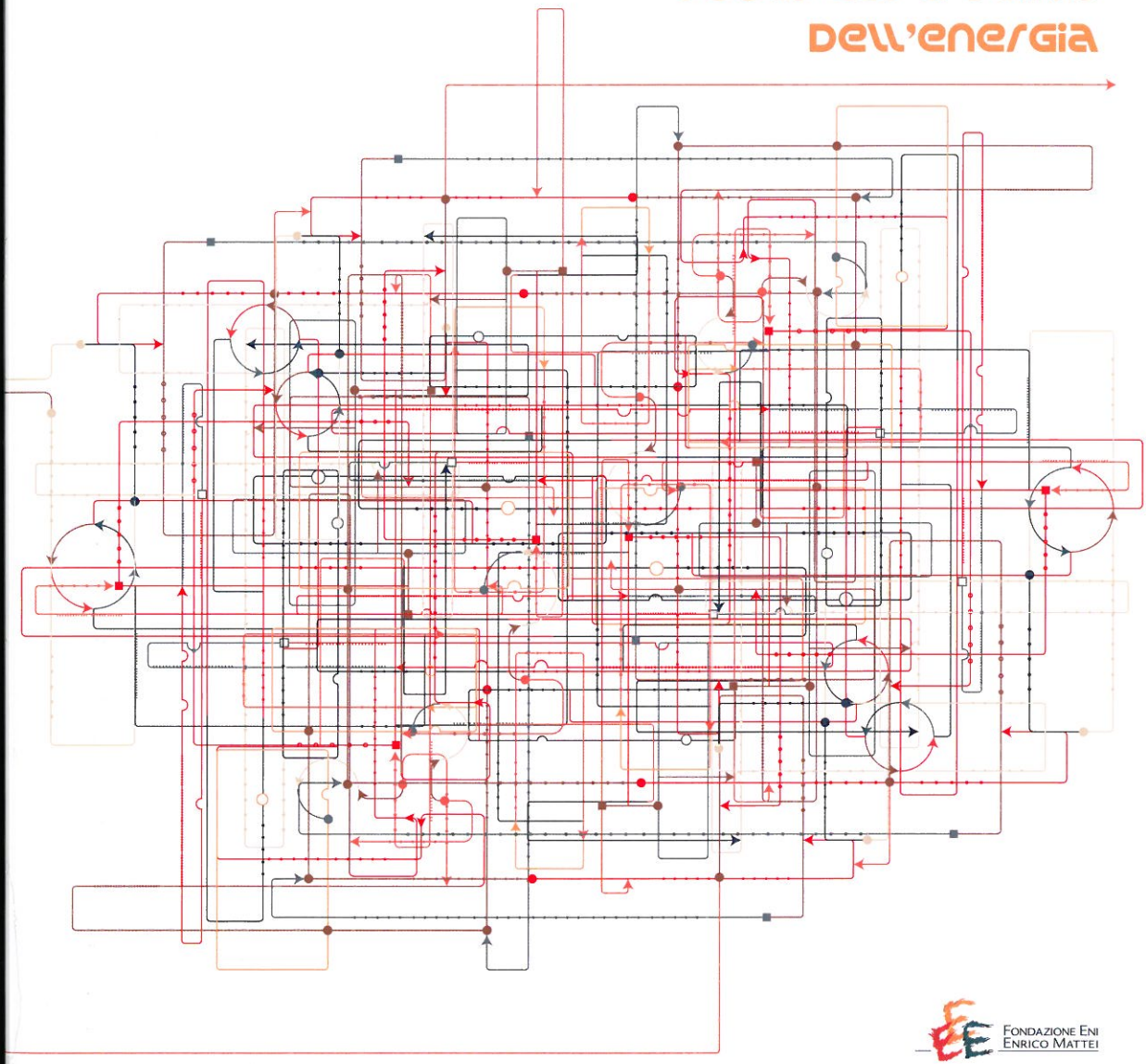
Sergio Carrà

Il percorso dello sviluppo: ruolo costruttivo dell'energia



Fondazione Eni Enrico Mattei

Prefazione 13

Capitolo 01 17
Sviluppo e necessità 18
01.01 - Cronaca di una crisi annunciata 18
01.02 - Un concetto elusivo 21

Capitolo 02 25
Una scienza ambigua 26
02.01 - Orizzonti di gloria 26
02.02 - Energia, forze e lavoro 27
02.03 - Che cos'è quella cosa chiamata calore? 29
02.04 - L'energia chimica 32
02.05 - Una scienza ambigua 33
02.06 - Il primo e il secondo principio della termodinamica 35
Scheda 1 36
02.07 - Le trasformazioni termodinamiche 37
Scheda 2 39
02.08 - L'energia libera 40
Scheda 3 41

Capitolo 03 43
Il rendimento energetico 44
03.01 - La produzione dell'energia termica 44
03.02 - Le macchine a vapore 45
03.03 - Il rendimento delle macchine termiche 48
Scheda 4 50
03.04 - Le macchine endotermiche 51
03.05 - Diavoli e micromotori 53

Capitolo 04 57
L'energia elettromagnetica 58
04.01 - La parola agli Dei 58
04.02 - Fiat lux 60
04.03 - Una nuova rivoluzione industriale 61
04.04 - Una profonda rivoluzione scientifica 64
04.05 - Il processo fotovoltaico 66
Scheda 5 68
04.06 - Il miracolo verde 69
Scheda 6 72

CAPITOLO 05 75
La chimica delle forze 76
05.01 - Una nuova forma di energia 76
05.02 - La natura dei processi chimici 77
Scheda 7 78
05.04 - Le celle a combustibile 79
05.05 - L'immagazzinamento dell'energia elettrica 80
05.06 - L'energetica dei processi biologici 82

CAPITOLO 06 87
Disponibilità e impieghi dell'energia 88
06.01 - Ritorno a Carnot 88
06.02 - Consumi ed usi dell'energia 89
06.03 - Le fonti "carbon free" 94
06.04 - Dalla corteccia o dal cuore dell'atomo 101
06.05 - Energia dalla terra 105
06.06 - Egemonia dei combustibili fossili 106

CAPITOLO 07 109
Energia della biosfera 110
7.1- Un pianeta color smeraldo 110
7.2- Impiego delle biomasse quali combustibili 113
7.3- Uno sguardo al futuro 114
7.4- Bilancio entropico della terra 119
Scheda 8 120
7.5-Uno sguardo all'ecologia 121
Scheda 9 122

CAPITOLO 08 127
Il percorso dello sviluppo 128
08.01 - Sviluppo e perplessità 128
08.02 - Il ruolo costruttivo dell'energia 129
08.03 - Processo all'energia 130
Scheda 10 135
08.04 - I pericoli di un pianeta inquieto 137
08.05 - Sviluppo e necessità 143
08.06 - Antropocene: una metafora delle catastrofi annunciate 146

CAPITOLO 09 153
Conclusioni 154

APPENDICE A 159
L'evoluzione dell'entropia 160

APPENDICE B 173

NOTE BIBLIOGRAFICHE 179

Lo sviluppo tecnologico e la struttura dell'economia moderna sono strettamente connessi con le questioni riguardanti l'energia, con ricadute ampie e diversificate che investono anche la nostra vita quotidiana. Pertanto i problemi connessi con la natura e l'accessibilità delle fonti energetiche, la loro utilizzazione e la loro gestione costituiscono l'oggetto di profonde e per certi aspetti preoccupate attenzioni.

Il presente volume è inteso a dare un contributo all'analisi di tali problemi. Ne copre alcuni significativi aspetti e non ha la pretesa di volerne indicare soluzioni di facile perseguibilità. Sarebbe troppo presuntuoso poiché i cammini che si possono intraprendere sono molteplici e contengono aspetti contrastanti strettamente dipendenti da vincoli sociali e politici. Anche se l'esposizione indugia su concetti scientifici, indispensabili per una comprensione adeguata delle questioni concernenti lo sviluppo e l'innovazione dei sistemi produttori di energia, i dettagli tecnici sono circoscritti in un numero limitato di SCHEDE la cui lettura può essere eventualmente elusa.

Alcune tabelle riportate in una appendice riguardano le unità di misura più frequentemente impiegate e sono intese ad agevolare la comprensione dei dati numerici menzionati.

Ringrazio la FEEM che si è presa l'onere di pubblicare il volume.

Sergio Carrà

SVILUPPO E NECESSITÀ

01.01-Cronaca di una crisi annunciata

Nella mia vita ho accumulato molti libri, alcuni li ho scritti, altri li ho regalati ed uno l'ho bruciato. L'autore sosteneva che i consumi, senza aggiungere molto alla felicità, portano al collasso dell'ecosistema, per cui solo una severa decrescita che li penalizzi può salvare il pianeta da una tragedia incombente. Curiosamente il mio disappunto nasceva dal fatto che non mi mancavano le elementari nozioni di economia per sapere che anche riducendo la vita all'indispensabile si devono comunque sviluppare delle attività produttive necessarie per sopperire ai sia pure modesti consumi di una popolazione in crescita, per il miglioramento della qualità dei servizi sociali ed infine per arginare i danni prodotti dalle calamità naturali che funestano un pianeta senza quiete. Inoltre si devono alimentare gli investimenti necessari per sostenere, e possibilmente rinnovare, le stesse attività produttive. Keynes, il maestro, ci ha insegnato che se si aumenta la propensione verso i consumi pubblici, magari stampando moneta, e privati, magari indulgendo verso qualche spesa voluttuaria, il reddito viene moltiplicato per un coefficiente maggiore di uno con conseguenti vantaggi; viceversa se la propensione ai consumi diminuisce ne deriva un ristagno economico con conseguenze inquietanti sull'occupazione. Meraviglia? Magia? No semplice fiducia nella crescita. Non a caso, in questi momenti di sobrietà, gran parte degli economisti ripetono insistentemente che solo essa potrà togliere il mondo occidentale dalla sacca della crisi nella quale si è insabbiato. Malgrado ciò l'ossessione della decrescita ci sta soffocando con messaggi mediatici di diversa provenienza. Persino alcuni di coloro che appartengono al sodalizio dell'economia reale nella quale

vale la regola dell'"*input meno output e quel che cresce è mio*" temono che il consumismo possa portare il mondo alla catastrofe.

In realtà la cultura della decrescita costituisce il retaggio del messaggio formulato nel 1798 da Thomas Malthus, un pastore anglicano che influenzò diversi economisti, primo fra tutti David Ricardo. Le sue idee sulla lotta per la sopravvivenza hanno ispirato Charles Darwin nella formulazione della teoria dell'evoluzione. Fruendo di un approccio matematico Malthus ha evidenziato che se la popolazione continua ad aumentare con una progressione geometrica e le risorse in modo lineare esisterà un punto di incontro fra le due curve al disopra del quale le risorse non risulteranno sufficienti per alimentare la popolazione e quindi l'umanità andrà incontro ad una grave carestia. Paradossalmente in concomitanza a questo messaggio è iniziata la rivoluzione industriale nella quale, grazie all'impiego di processi produttivi innovativi, è decollata un'impressionante crescita economica che ha traghettato la società occidentale verso un benessere generalizzato.

Nell'aprile del 1968 un gruppo di persone di rilevanza culturale e politica si è incontrato a Roma dietro invito dell'industriale Augusto Peccei e dello scienziato scozzese Alexander King. Lo scopo era di riesaminare ed eventualmente rinverdire il messaggio malthusiano sul depauperamento delle risorse del pianeta. In tale ambito il gruppo, battezzato Club di Roma, commissionò nel 1971 ad alcuni ricercatori del MIT guidato da Jay W. Forrester, esperto di dinamica dei sistemi, una simulazione sul futuro del nostro pianeta. I risultati sono stati pubblicati in un rapporto intitolato "*The limits to growth*" [1] il quale esordiva affermando che restavano dieci anni per impegnarsi in un programma per il risanamento dell'ambiente. Il rapporto attraverso l'analisi delle interazioni fra diversi fattori, quali la popolazione,

la produzione di alimenti, l'industrializzazione, lo sfruttamento delle risorse naturali e l'inquinamento, evidenziava l'incombenza di un forte declino delle risorse materiali ed energetiche, accompagnato da un significativo aumento dell'inquinamento ambientale. Con conseguenze nefaste sull'avvenire del mondo, destinato ad una catastrofe che avrebbe dovuto innescarsi nel 2001. Con il senno di poi possiamo constatare con sollievo che la previsione non si è verificata, riscontrando un crescente senso di ironia da parte di osservatori che hanno riletto il rapporto 40 anni dopo. Da parte di altri però si sostiene che la catastrofe è solo rimandata e con spirito più costruttivo, se così si può dire di chi auspica catastrofi, ritengono che sia maturato il tempo di rispolverare il modello del Club di Roma per ottenere risposte più affidabili sulla data dell'inizio del collasso. Tutto ciò partendo dalla constatazione che quando è stata condotta la simulazione le informazioni accessibili erano povere ed incorrette e venivano gestite da calcolatori vetusti rispetto a quelli di cui oggi disponiamo.

Personalmente sono scettico sulla possibilità che tale indagine porti a risultati utili per dissipare le angosce suscitate dalla dottrina della decrescita. La struttura del modello del Club di Roma incorpora infatti un giorno del giudizio con l'unica libertà di determinarne la data, con tutte le incertezze che si incontrano nel fare previsioni "sul futuro". In sostanza il modello non offre scappatoie. È simile ad una tragedia classica nella quale i personaggi con le loro manifestazioni ci emozionano e ci coinvolgono anche se siamo consapevoli che un destino ineluttabile li renderà vittime di una fine violenta.

Si tratta di un aspetto che merita un approfondimento chiedendoci se in un futuro a vista d'uomo si intravedano, e quali siano, le alternative in grado di affrancare la società umana da tale percorso apparentemente obbligato.

Tutto ciò assumendo come riferimento l'energia, che sin dall'esordio della rivoluzione industriale è stata alla base della crescita economica, ma la cui disponibilità sembra ora messa in discussione da valutazioni che vanificherebbero ogni possibilità di crescita.

01.02 - **Un concetto elusivo**

Che cos'è l'energia? Richard Feynman, il genio, nelle sue famose lezioni[2] ha scritto: *"È importante rendersi conto che nella fisica attuale non abbiamo conoscenza di che cosa sia l'energia"*. Freeman Dyson, suo allievo ed amico, sostiene che l'energia è una quantità trascendente che ha saputo sopravvivere in modo duraturo ad ogni cambiamento apportato all'impostazione delle discipline scientifiche[3]. Questo approccio potrebbe suscitare imbarazzo a chi si accinge ad evidenziarne il ruolo su questioni concrete quali lo sviluppo tecnologico ed avendo la piena consapevolezza che le sue ricadute sono così ampie e diversificate da investire i molteplici aspetti della nostra vita quotidiana. Tanto che i problemi connessi con la natura e l'accessibilità delle fonti energetiche, la loro utilizzazione e gestione sono l'oggetto di profonde e per certi aspetti preoccupate attenzioni.

In realtà se affrontiamo il problema sotto una diversa angolazione possiamo constatare che dell'energia conosciamo alcuni peculiari aspetti, primo fra tutti che si può ricavare da diverse fonti quali il petrolio, i nuclei di alcuni atomi, il sole, il vento. Inoltre si presenta in diverse forme che comprendono la termica, l'elettrica, l'elettromagnetica e la nucleare, fra di loro interscambiabili attraverso trasformazioni che ne lasciano però inalterata la quantità totale presente in un determinato sistema. Quindi poiché l'energia non possiamo ne crearla ne distruggerla potremmo accontentarci di quella che abbiamo a disposizione senza essere ossessionati dai timori che ci

trasmettono i media di un suo depauperamento. In realtà esiste un'altra grandezza, chiamata entropia che a differenza dell'energia aumenta inesorabilmente nelle trasformazioni dell'energia, come le tasse. E nello steso modo che esse diminuiscono i nostri introiti diminuisce l'energia utile per le nostre attività.

In sostanza l'energia bisogna soprattutto saperla usare per accorgersi paradossalmente che, come aveva previsto l'economista vittoriano Stanley Jevons, è sbagliato supporre che l'uso parsimonioso dei combustibili sia equivalente ad una diminuzione dei consumi come viene confermato dall'esperienza.

Da qualche decina di anni i problemi dell'utilizzo e approvvigionamento dell'energia si sono intrecciati con quelli concernenti la tutela dell'ambiente, risvegliando la convinzione emotiva di dover agire con urgenza per impedire evoluzioni che secondo alcuni potrebbero risultare catastrofiche. Pertanto prendendo decisioni intese a modificare l'attuale modello di sviluppo, orientando in opportune direzioni gli investimenti futuri e la ricerca scientifica. Purtroppo la complessità dei problemi emergenti che includono aspetti scientifici, tecnologici, sociali e politici, rende difficile individuare percorsi univoci che risultino nel contempo ragionevoli e privi di aspetti conflittuali. Per poterli confrontare è necessario scrollarsi da addosso alcuni luoghi comuni che inquinano molte convinzioni ispirate da un diffuso conformismo e fare appello alle più ortodosse conoscenze scientifiche. Prime fra tutte quelle della termodinamica, ovvero di quella disciplina nata con il decollo della rivoluzione industriale la quale ha tratto dall'impiego dell'energia la linfa per la sua affermazione.

UNA SCIENZA AMBIGUA

02.01 - **Orizzonti di gloria**

Nell'anno 1824 comparve nelle librerie di Parigi un volumetto dal titolo rutilante "*Riflessioni sulla potenza motrice del fuoco*"[1]. Con un linguaggio semplice, parco nell'impiego di formule anche se trattava di un argomento scientifico, anticipava la legge che sta alla base delle trasformazioni spontanee naturali che avrebbe acquistato una posizione di primo piano nella cultura scientifica e filosofica sotto la denominazione di secondo principio della termodinamica.

L'autore, Sadi Carnot, era un giovane ufficiale dell'esercito francese di 30 anni. Laureato in ingegneria aveva raggiunto la sua maturità intellettuale nel periodo nel quale in Francia si stava sviluppando un grande interesse per le macchine a vapore sotto lo stimolo dei progressi che venivano realizzati nella rivale Inghilterra. Grazie al suo saggio il giovane Carnot può essere considerato il principale precursore della termodinamica, anche se sfortunatamente il suo pionieristico lavoro fu preso in considerazione solo dopo la morte, che avvenne prematuramente nel 1832 all'età di 36 anni durante una epidemia di colera. La sua indagine, anche se trae spunto dalla tecnologia delle macchine termiche con l'intento di migliorarla, ha costituito in realtà un punto di svolta per gli studi successivi sulle trasformazioni dell'energia con uno respiro che comprende l'intero Universo. Curiosamente chi ne trasse minor vantaggio furono proprio i costruttori delle macchine a vapore cui il libro era dedicato perché già fruivano dei suggerimenti dell'ingegnere scozzese James Watt che, avendo dedicato molti sforzi allo studio di tali macchine, era riuscito ad evidenziare i criteri per migliorarne il funzionamento.

02.02 - Energia, forze e lavoro

La parola energia trae la sua etimologia dal greco antico perché è stata introdotta da Aristotele per indicare la capacità di agire. Fa ormai parte del linguaggio comune poiché sappiamo che riguarda una cosa che può essere fornita dal petrolio, dal carbone, dal vento, dal sole e dai nuclei atomici. Sappiamo inoltre che non si può ottenere dal nulla e che si presenta in diverse forme. Il concetto di energia è centrale in tutta la fisica ed è presente nelle sue più importanti equazioni come quella di Einstein sulla gravità e quella di Schrödinger che sta alla base della meccanica quantistica[2]. Per acquisire consapevolezza delle sue diverse implicazioni è necessario associarla ai concetti di massa, forza e lavoro ad essa strettamente collegati. Nell'ambito della fisica newtoniana la forza si identifica con la causa che accelera il movimento. Il responso a tale azione è una grandezza chiamata massa, che costituisce una proprietà intrinseca della materia la cui entità è espressa dal rapporto fra la forza che sollecita il moto e l'accelerazione, ovvero la variazione della velocità.

Le forze sono grandezze vettoriali che richiedono venga indicata la direzione lungo la quale agiscono. Oltre che influire sul moto di un corpo, possono anche alterarne le dimensioni e la forma esercitando un lavoro la cui sua entità è espressa dal prodotto di due grandezze, una fisica e una geometrica, quest'ultima connessa con la variazione della configurazione del sistema. Il lavoro meccanico è dato dal prodotto di una forza per lo spostamento subito da un corpo, come si verifica nel sollevamento di un oggetto il cui peso esprime la forza applicata. Oppure dal prodotto della pressione, che esprime la forza esercitata su una superficie unitaria e misurabile con un manometro, per una variazione di volume come si

verifica nella compressione con uno stantuffo di un gas contenuto in un cilindro. L'energia costituisce la capacità di compiere un lavoro. Può essere associata al moto, ed in tal caso si chiama cinetica, o riflettere l'interazione fra corpi dipendente dalla loro reciproca posizione nello spazio. In questo caso si chiama potenziale.

Nell'ambito della fisica moderna le forze guidano le interazioni fra le particelle di cui è costituito il mondo a tutte le scale che si estendono dagli atomi alle galassie. Ne sono state individuate quattro cui corrispondono diversi tipi di energia potenziale chiamate rispettivamente[3]:

- ***gravitazionale:*** è la più familiare e si manifesta fra i corpi dotati di massa per cui è comune a tutta la materia. Permette di descrivere, con grande precisione, il moto dei pianeti.
- ***elettromagnetica***: agisce fra le particelle dotate di carica elettrica sia negativa che positiva. È responsabile della formazione degli atomi e delle molecole.
- ***nucleare debole***: agisce all'interno dei nuclei atomici ed è responsabile della radioattività β nella quale ha luogo l'emissione di un elettrone e di un neutrino.
- ***nucleare forte***: agisce all'interno dei nuclei atomici dove tiene uniti i protoni e i neutroni

Le prime intervengono nelle fonti di energia più largamente impiegate nelle attività umane ovvero quelle fossili e quelle chiamate rinnovabili, mentre l'ultima è coinvolta nei processi di fissione nucleare.

Le quattro forze fondamentali possono essere descritte invocando particolari stati dello spazio chiamati campi nei cui punti sono definite l'entità e la direzione di una forza. Questo approccio pur non essendo privo di una connotazione metafisica, si presta ad una rappresentazione

matematica che ci affranca dall'imbarazzante problema di dover introdurre l'esistenza di istantanee azioni a distanza.

L'energia soddisfa ad una legge di conservazione in virtù della quale in un sistema isolato il suo valore si mantiene inalterato indipendentemente dalle trasformazioni che possono avere luogo fra le sue diverse forme. In altri termini essa non può essere ne creata ne distrutta. Questa legge di conservazione che costituisce una pietra miliare della fisica, è affiorata nella prima metà dell'Ottocento dalle ceneri dei fallimenti delle ricerche sul moto perpetuo, in modo quasi inosservato finché non venne sancita in modo preciso in un'importante memoria del 1847 di Hermann von Helmholtz, un medico che si dedicò con grande successo a ricerche sulla fisica matematica.

In seguito sarebbe stata ampliata evidenziando che la massa si può trasformare in una grande quantità di energia che, in accordo alla nota relazione di Einstein, è espressa dal prodotto della massa stessa per il quadrato della velocità della luce. Come accade nei reattori nucleari e, purtroppo, nelle bombe nucleari.

02.03 - **Che cos'è quella cosa chiamata calore?**

L'attenzione verso il calore, o più propriamente l'energia termica, si è manifestata alla fine del XIII secolo invocando l'esistenza di un fluido imponderabile ed elastico diffuso in tutto lo spazio chiamato calorico, che poteva combinarsi con la materia alterandone il comportamento. Questa teoria pur essendo sbagliata non ha impedito lo sviluppo delle ricerche sperimentali sulle misure dello stato termico dei corpi mediante i termometri, il primo dei quali, basato sulla dilatazione dell'alcol etilico, realizzato da Daniel Fahrenheit nel 1709. Ad esso seguirono i termometri a mercurio, a

termocoppie e così via verso dispositivi sempre più precisi e sofisticati. Le misure vengono riferite a diverse scale fra le quali prevale quella di Celsius nella quale il valore di 0°C corrisponde al punto di fusione del ghiaccio e quello di 100°C all'ebollizione dell'acqua. Di particolare importanza è la temperatura assoluta la cui scala è stata introdotta sulla base del secondo principio da Kelvin, ed è espressa dalla somma della temperatura in gradi Celsius addizionata di 273,16; viene indicata con la lettera K.

Nella prima metà dell'Ottocento vennero fatti progressi significativi anche sui processi di trasmissione del calore. In sostanza per quanto strampalata fosse, la teoria del calorico offriva risorse sufficienti per non impedire il progresso delle ricerche che solo successivamente si sarebbero ricondotte ad una diversa teoria in base alla quale la materia è costituita da piccoli invisibili atomi in rapido movimento. In realtà il credito che l'atomismo ha avuto nella cultura e nella scienza ha seguito vicissitudini alterne. Introdotti dal filosofo greco Democrito, contemporaneo di Platone ed allievo di Leucippo, gli atomi venivano concepiti come particelle originarie indivisibili che si contrapponevano alla divisibilità infinita dello spazio geometrico sostenuta da Zenone nei suoi inquietanti paradossi. L'atomismo ha trovato il suo aedo in Lucrezio, poeta romano che nel *De Rerum Naturae* l'ha utilizzato per diffondere il messaggio materialistico ed edonistico che aveva appreso dagli scritti di Epicuro. Memore di questi fatti Dante ha collocato Democrito all'Inferno accusandolo di *"avere posto il mondo a caso"*.

Nella scienza ufficiale il concetto di atomo ha ricevuto piena dignità solo all'inizio del Novecento con la pubblicazione dei lavori di Jean Baptiste Perrin nei quali venivano interpretati i dati sperimentali sul comportamento delle dispersioni colloidali. Tutto ciò fruendo di una teoria formulata da Einstein nel 1905, nella quale i moti erratici zigzaganti delle particelle

disperse in un liquido, scoperti nel 1827 dal botanico Robert Brown osservando delle sospensioni di granelli di polline, vennero attribuiti all'influenza delle fluttuazioni dell'energia associate ai movimenti degli atomi di cui si supponeva fosse costituita la materia.

Malgrado questo tardivo riconoscimento il decollo della chimica moderna, avvenuto nella seconda metà del Settecento ad opera di John Dalton, aveva fruito del concetto di atomo, inteso come una particella di piccole dimensioni circondata da un'atmosfera di calorico. Nel 1811 il conte Amedeo Avogadro, rampollo di una nobile famiglia torinese e cultore delle scienze chimiche, aveva formulato una legge in base alla quale volumi uguali di gas nelle stesse condizioni di temperatura e pressione contengono lo stesso numero di particelle. Non tutti però accettavano il modello atomico poiché la scienza stava vivendo un momento gravido di conflitti, dominato dai litigi fra i suoi cultori di diversa formazione e soprattutto di diversa nazionalità.

La moderna teoria cinetica del calore che lo lega all'energia cinetica del movimento di atomi venne presa in seria considerazione solo nella seconda metà del XIX secolo in concomitanza all'introduzione del principio di conservazione dell'energia e con l'esordio della termodinamica. Il primo scienziato che superò la riluttanza verso tale teoria fu Rudolf Clausius, nativo in Germania ma in carica quale professore presso il Politecnico Federale di Zurigo, che nel 1857 pubblicò un articolo dal titolo emblematico *"Sulla natura del movimento che chiamiamo calore"*. I suoi successori nello sviluppo della teoria furono due giganti nel panorama scientifico: James Clerk Maxwell e Ludwig Boltzmann.

02.04 - L'energia chimica

Per un chimico il mondo è formato di protoni, neutroni ed elettroni. Le prime due particelle si combinano nei nuclei atomici elettricamente positivi, attorno ai quali gravitano gli elettroni negativi dando origine agli atomi, che a loro volta si combinano per formare le molecole. L'esistenza di strutture molecolari stabili è dovuta alla formazione di legami fra diverse coppie di atomi. A ciascun legame è associato un contenuto di energia potenziale di natura elettromagnetica che in una molecola biatomica si identifica con quella richiesta per dissociarla liberando gli atomi a distanza elevata. A ciascun legame si attribuisce un valore medio di energia, ottenuto dai valori sperimentali delle energie coinvolte in alcune reazioni di riferimento[4].

Attualmente disponiamo di conoscenze molto dettagliate sulla struttura di gran parte delle molecole che intervengono nelle trasformazioni naturali ed in quelle realizzate dall'uomo; esse riguardano la natura dei legami presenti fra i diversi atomi di cui sono costituite, le loro lunghezze e gli angoli formati fra di loro. Ad esempio gli idrocarburi sono costituiti da atomi di carbonio e di idrogeno, e sono i costituenti del petrolio che allo stato attuale è la principale fonte di energia impiegata dall'uomo.

In una reazione chimica alcune molecole vengono trasformate in altre in modo tale da conservare la natura e il numero di atomi coinvolti nella trasformazione stessa. In altri termini prima e dopo la reazione cambiano solo le molecole e quindi i legami in gioco. Ad esempio la reazione del metano CH_4, il più semplice degli idrocarburi, con l'ossigeno O_2 per formare anidride carbonica CO_2 e acqua H_2O si scrive come segue:

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$$

Si tratta di una reazione esotermica poiché libera quantità significative di

calore e pertanto sta alla base dei processi di combustione. Queste reazioni giocano un ruolo fondamentale nei processi di produzione dell'energia; fra di esse meritano una particolare menzione quelle di combustione del carbone e degli idrocarburi alle quali va attribuito il merito di produrre la quasi totalità dell'energia impiegata dall'uomo. In seguito avremo l'occasione di approfondire altre reazioni che si riferiscono a trasformazioni chimiche che si offrono come candidate per surrogare nei processi energetici quelle di combustione.

"La vita non è che una vastissima gamma di reazioni chimiche coordinate" ha affermato James Watson, cui si deve, unitamente a Francis Crick, la scoperta della struttura del DNA. Ciascuna di queste reazioni chimiche è associata ad un evento energetico, ma tuttavia si deve constatare che malgrado l'energia chimica intervenga in modo determinante nelle attività umane, essa è presente in modo trascurabile nell'Universo poiché la parte del leone è fatta dall'energia gravitazionale, che muove i pianeti e le galassie, unitamente a quella nucleare coinvolta nelle trasmutazioni cosmiche.

02.05 - **Una scienza ambigua**

Termodinamica è il nome conferito nel 1854 da lord Kelvin, un fisico matematico di grandi interessi formatosi a Cambridge, alla nuova teoria meccanica del calore. Un sistema termodinamico è costituito da una certa quantità di materia in cui sono presenti diversi composti chimici sotto forma di gas, liquidi e solidi, che occupa una particolare regione dello spazio separata dal mondo esterno chiamato ambiente[5]. Si assume che in corrispondenza della superficie di separazione siano definite le condizioni, dette al contorno, caratterizzanti gli scambi di energia e

materia che possono avere luogo fra il sistema stesso e l'ambiente ad esso circostante. Se tali scambi non possono avere luogo il sistema viene definito isolato. In realtà si tratta di una idealizzazione perché tale non è nemmeno l'Universo intero per la presenza dei buchi neri. La terra nella quale ci sentiamo segregati è invece un esempio di sistema aperto perché riceve energia dal sole, che ritrasmette nell'ambiente cosmico sotto la forma di radiazioni infrarosse. Inoltre riceve materia sotto la forma di meteoriti.

Un sistema isolato, quindi non influenzato dal mondo esterno, si avvicina ad uno stato di equilibrio nel quale si mantiene inalterato nel tempo, indipendentemente dalle condizioni iniziali eccetto il valore dell'energia totale che viene conservato. Quindi non è soggetto a cambiamenti in grado di modificare sia le quantità relative dei gas, liquidi e solidi in esso presenti sia la sua composizione chimica.

Anche se l'etimologia della parola termodinamica deriva dall'unione di due termini greci che indicano rispettivamente calore e movimento, la variabile tempo è assente dalle formulazioni matematiche invocate per esprimere le trasformazioni stesse. Infatti per agevolare le applicazioni si assume che avvengano attraverso una successione di stati di equilibrio, ignorando l'esistenza del tempo poiché, per citare Maxwell "al passato viene attribuito lo stesso valore del futuro". Queste trasformazioni definite reversibili sono degli ossimori perché si sforzano di conciliare il movimento con l'equilibrio.

Di questa lacuna, o meglio ambiguità, se ne era accorto Williard Gibbs un fisico matematico americano di grande talento nato e vissuto negli Stati Uniti in qualità di professore a Yale. In una sua memoria del 1875 diventata ormai classica[6] egli poneva l'accento sul ruolo della termodinamica

per individuare le condizioni di equilibrio. Esse sono caratterizzate dall'uniformità dei valori della temperatura della pressione e, per sistemi in cui siano presenti diversi componenti chimici ripartiti fra gas, liquidi e solidi, di una grandezza specifica per ciascuno di essi, chiamata potenziale chimico. Tutto ciò attraverso una impostazione matematica avente la coerenza e il nitore delle opere classiche della geometria.

I fenomeni fisici e chimici sono però soggetti ad un'implacabile freccia del tempo per cui gli esseri umani non ringiovaniscono, dai ceppi tagliati non rispuntano gli alberi ed il nostro sole si spegnerà fra qualche miliardo di anni[7]. Il ricupero di questi aspetti é pertanto indispensabile sia per poter perseguire una più profonda comprensione dei fenomeni naturali sia per l'applicazione della termodinamica ai problemi riguardanti l'impiego dell'energia nelle attività umane.

02.06 - **Il primo e il secondo principio della termodinamica**

Spetta a James Prescott Joule, ricercatore appartenente ad una famiglia di birrai di Manchester, il merito di avere condotto nel 1841 un'esperienza nella quale ha dimostrato che effettuando in modo controllato su una certa quantità di acqua un lavoro prodotto dall'agitazione delle pale di un mulinello, si ottiene una variazione di temperatura pari a quella che si otterrebbe dall'assorbimento di una ben definita quantità di calore. Pertanto veniva evidenziato che il calore costituisce una forma di energia e può essere quindi misurato con le stesse unità del lavoro. Questo notevole risultato costituisce un'espressione semplificata del principio di conservazione dell'energia che in questo caso specifico viene denominata **primo principio della termodinamica.**

SCHEDA 1

Per formulare il bilancio energetico di un sistema è opportuno distinguere l'energia associata al suo moto, nelle componenti cinetica E_k e potenziale E_p, da quella interna U esprimente la somma delle energie cinetica e potenziale delle particelle di cui è costituito. La variazione totale di energia risulta allora espressa da:

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_k + \Delta E_k$$

dove ΔX indica la variazione della generica grandezza X.
Le ricerche di Joule dimostrano che il calore Q ed il lavoro W si possono misurare con le stesse unità, per cui la variazione di energia interna si può scrivere come segue:

$$\Delta U = Q + W$$

Questa relazione sancisce il fatto che la somma dell'energia termica e del lavoro che vengono trasferite ad un sistema contribuiscono ad aumentarne l'energia interna.

L'enunciazione del **secondo principio** è contenuta in una memoria di Clausius pubblicata nel 1864, dal titolo "*Trattato sulla teoria meccanica del calore*". La legge evolutiva delle trasformazioni spontanee viene formulata fruendo di un'opportuna grandezza chiamata entropia, destinata ad acquistare nel panorama scientifico e mediatico una posizione di primo piano[8]. Inoltre avrebbe fatto perdere il sonno a molti studenti alla vigilia dell'esame di termodinamica. Sembra che il leggendario matematico John von Neumann, alla domanda a lui posta da Claude Shannon nel 1948 su come dovesse battezzare una grandezza introdotta per misurare il contenuto di informazione di un messaggio, gli abbia risposto: "Chiamala entropia, nessuno sa cosa sia con certezza per cui in ogni discussione sarai sempre avvantaggiato".

L'entropia, solitamente caratterizzata con la lettera S, è una grandezza definita per ogni stato di un sistema termodinamico in equilibrio ed i suoi valori dipendono dalle variabili che caratterizzano lo stato stesso, in particolare la temperatura e la pressione. I sistemi isolati con energia costante sono soggetti a trasformazioni spontanee verso lo stato di equilibrio al quale corrisponde il valore massimo dell'entropia. In altri termini nelle trasformazioni naturali l'entropia non può che aumentare in accordo all'esistenza di una freccia del tempo. Pertanto mediante il suo impiego si individua lo stato di equilibrio di un sistema.

L'entropia ci permette anche di caratterizzare la qualità delle diverse forme di energia, che risulta tanto più elevata quanto più basso è il loro contenuto entropico. Esse risultano ordinate secondo la seguente graduatoria[9]:

gravitazionale>nucleare>elettromagnetica>termica

L'Universo è soggetto ad incessanti trasformazioni attraverso le quali ha luogo il degrado dalla forma più qualificata di energia a quella di più bassa qualità. Ovvero verso un'inesorabile, ma fortunatamente remota, morte termica anticipata da lord Kelvin.

02.07 - Le trasformazioni termodinamiche

Se due corpi solidi a diversa temperatura vengono messi a contatto con il passare del tempo raggiungono una temperatura uniforme grazie al passaggio di calore dal corpo caldo a quello freddo. Se si apre la valvola di una bombola contenente un gas compresso il contenuto fuoriesce sino al raggiungimento di un valore uniforme della pressione. Se si lascia cadere una zolla di zucchero in un bicchiere d'acqua dopo un tempo più o meno lungo si ottiene una soluzione liquida omogenea. Queste trasformazioni

vengono chiamate irreversibili per distinguerle da quelle dette reversibili, che si ipotizza si svolgano attraverso una successione di stati con differenze di temperatura e di pressione fra sistema e ambiente molto piccole e pertanto in condizioni prossime a quelle di equilibrio. Esse si possono realizzare solo se la trasformazione viene condotta in un tempo molto elevato, al limite infinito.

Per comprendere la natura delle deviazioni dalla reversibilità riferiamoci al caso di un gas che fluisce in una particolare direzione con un gradiente della velocità perpendicolare alla direzione stessa del flusso. Ciascuna molecola è soggetta a due componenti della velocità la prima associata ad un movimento caotico che subisce continui cambiamenti di direzione e valore in seguito alle collisioni con le altre molecole. La seconda è invece diretta nella direzione di flusso del fluido e riflette il moto coerente di insieme del gas, detto anche convettivo, esemplificabile attraverso lo scorrimento di diversi strati di fluido che si muovono uno rispetto all'altro con diversa velocità. A conseguenza degli scambi di energia dovute alle collisioni fra le molecole soggette ai movimenti caotici, in corrispondenza di una superficie ideale interna tangenziale alla direzione del flusso è presente una resistenza allo scorrimento. Essa si manifesta attraverso un attrito interno associato ad un parziale degrado dell'energia del fluido per il passaggio dal moto convettivo ordinato alla forma meno qualificata dell' energia, quella termica associata ai moti caotici molecolari.

Se inoltre ha luogo uno scambio di calore con l'ambiente la variazione globale di entropia è data dalla somma di un termine ad esso associato, che può essere positivo o negativo a seconda che il calore stesso venga aggiunto o sottratto al sistema, con il termine dovuto alle dissipazioni irreversibili che è sempre positivo.

SCHEDA 2

L'entropia, a differenza dell'energia, non obbedisce ad una legge di conservazione. All'interno di un sistema si individuano trasformazioni irreversibili nelle quali ha luogo la generazione di entropia ΔS_{irr} dovuta al degrado dell'energia. Se indichiamo con W_{diss} il lavoro speso in un processo dissipativo irreversibile la variazione di entropia risulta espressa da:

$$\frac{W_{diss}}{T} = \Delta S_{irr} > 0$$

Riferiamoci ora ad un sistema aperto che scambi reversibilmente calore con n sorgenti esterne, mentre nel suo interno hanno luogo delle trasformazioni irreversibili con conseguente generazione di entropia ΔS_{irr}. Globalmente ha luogo una variazione di entropia espressa della relazione:

$$\Delta S = \sum_n \frac{Q_n}{T_n} + \Delta S_{irr} = \Delta S_{rev} + \Delta S_{irr}$$

essendo Q_n e T_n rispettivamente il calore scambiato reversibilmente nell'n-sima sorgente a temperatura T_n. La somma va estesa a tutti gli scambi di calore cui è associato un aumento di entropia se il calore viene trasferito dall'esterno verso l'interno, o una diminuzione nel caso contrario.
La variazione globale di entropia può essere positiva o negativa, tuttavia vale sempre la condizione $\Delta S_{irr} > 0$.
Per un sistema isolato ovviamente $\Delta S > 0$.

In conclusione ad ogni trasformazione che abbia luogo in un sistema termodinamico isolato, ovvero senza possibilità di scambio di materia ed energia con l'ambiente, è associato un aumento spontaneo di entropia. Pertanto:

- ***L'energia di un sistema isolato è costante.***
- ***L'entropia di un sistema isolato può solo aumentare o rimanere costante.***

Le due affermazioni precedenti compendiano la formulazione di Clausius dei principi della termodinamica.

02.08 - L'energia libera

In molte applicazioni della termodinamica si devono fronteggiare problemi riguardanti trasformazioni che hanno luogo in sistemi in grado di scambiare energia termica con l'ambiente mantenendosi a temperatura costante. Perché ciò si verifichi è necessario che si trovino a contatto con un ambiente che agisce come un termostato poiché si comporta come un serbatoio di calore che vincola la temperatura ad un determinato valore. In questa situazione il lavoro che un sistema può effettuare sull'ambiente è espresso da una variazione di energia interna diminuita della quantità di energia termica che l'ambiente stesso deve restituire al sistema per mantenere inalterata la sua temperatura. Di questo fatto ne ebbe chiara percezione Helmholtz che introdusse un'opportuna grandezza chiamata energia libera (SCHEDA 3) estesa da Gibbs ai sistemi a temperatura e pressione costanti. Tuttavia per condurre bilanci energetici in sistemi condensati, liquidi e solidi, a conseguenza della loro modesta comprimibilità, l'approccio non si scosta molto da quello di Helmholtz.

In sostanza se un sistema termodinamico è soggetto ad una trasformazione a temperatura costante il massimo lavoro che può produrre in condizioni di reversibilità è dato dalla sua variazione di energia interna cui viene sottratta una variazione di energia che non risulta utile per produrre lavoro perché caratterizzata da un elevato contenuto di entropia.

SCHEDA 3

In una trasformazione reversibile condotta a temperatura costante si ottiene:

$$W_{rev} = \Delta U - Q_{rev} = \Delta U - T\Delta S = \Delta F$$

Essa deriva dall'espressione del primo principio (SCHEDA 1) tenendo inoltre conto che in un processo reversibile il calore scambiato si identifica con il prodotto della temperatura per la variazione di entropia. Quindi è stata introdotta la grandezza:

$$F = U - TS$$

che viene chiamata energia libera. A temperatura costante la sua variazione fornisce il lavoro ottenibile da una trasformazione reversibile. Si tratta del valore massimo, poiché la presenza fatale di irreversibilità degrada parte dell'energia che potrebbe essere trasformata in lavoro.
Da quanto precede si può anche esprimere la variazione di energia interna come segue:

$$\Delta U = \Delta F + T\Delta S$$

ipotizzando che il sistema sia costituito da due componenti. Lo stato del primo, avente energia F, dipende da variabili macroscopiche quali il volume, soggette a variazioni "lente", che sono in grado di compiere un lavoro ad esempio attraverso l'espansione di un gas. Lo stato del secondo dipende invece dai moti "rapidi" delle variabili microscopiche, atomiche, che creano variazioni di entropia senza compiere lavoro. Si distingue così fra un'energia "utile" che può essere convertita in lavoro ed una "inutile" che si accumula nel sistema. Lo spartiacque fra le due forme di energia si individua nel contenuto di entropia del sistema globale. Infatti se in un sistema ad energia fissata si crea entropia per effetto di una trasformazione si consuma energia libera sino alla sua fine quando si raggiunge l'equilibrio.

IL RENDIMENTO ENERGETICO

03.01 - La produzione dell'energia termica

Sin dalla preistoria la combustione ha costituito la più importante sorgente di energia e tuttora fornisce l'85% di quella utilizzata nelle attività umane. Comprende le reazioni chimiche in cui l'ossigeno si combina con diversi composti chiamati genericamente combustibili. Le più semplici sono quella dell'idrogeno con l'ossigeno con formazione di acqua e quella del carbone con formazione di anidride carbonica, liberando in entrambi i casi quantità significative di calore. I principali combustibili utilizzati per la produzione di energia sono gli idrocarburi, ovvero i composti del carbonio con l'idrogeno. Il più semplice è il metano, che rappresenta il principale costituente del gas naturale (circa 90%); è presente nel sottosuolo da dove viene estratto mediante trivellazione. Il petrolio è costituito da una miscela complessa di idrocarburi ed il suo nome deriva dal greco *olio di roccia* perché ha l'aspetto di un liquido nero presente in giacimenti che si trovano negli strati superiori della crosta terrestre. Il suo utilizzo ebbe inizio quando Edwin Drake, un ex ferroviere che si spacciava per colonnello dell'esercito, sfidando lo scetticismo generale scavò il primo pozzo in Pennsylvania ed estrasse per pompaggio il petrolio. L'operazione, condotta nell'estate del 1859, segnò l'inizio di un'impresa che ha guidato il percorso dello sviluppo tecnologico ed economico della nostra società con un elevato livello di complessità ed incertezza. Attualmente per soddisfare la vorace richiesta di energia mondiale vengono estratti e trasformati circa 1000 barili (160 litri ciascuno) di petrolio al secondo. Si tratta quindi di una materia prima strategica attorno alla quale si sono intrecciate alleanze e sono nati conflitti internazionali. In sostanza le moderne economie industriali sono basate

sul carbonio e la loro attività principale è la combustione.

La peculiarità dei processi di combustione deriva dall'interazione fra fenomeni fisici e chimici[1]. Una miscela gassosa contenente un combustibile e ossigeno ben rimescolati per accendersi e dare inizio alla combustione deve raggiungere una temperatura detta di ignizione in corrispondenza della quale la velocità con la quale viene liberato il calore della reazione risulti superiore a quella con cui viene sottratto dall'ambiente circostante. Solo se questa condizione si verifica la combustione decolla producendo una fiamma caratterizzata da una elevata temperatura e dall'emissione di radiazioni luminose.

Se un combustibile gassoso viene iniettato in una corrente contenente ossigeno la sua velocità di consumo è determinata da quella della diffusione per arrivare a contatto con l'ossigeno stesso, essendo questa condizione necessaria perchè abbia luogo la reazione. Queste fiamme, vengono dette a diffusione e trovano un impiego negli ugelli dei bruciatori e nei motori a reazione poiché in entrambi i casi il combustibile e l'ossigeno contenuto nell'aria vengono alimentati attraverso due condotti concentrici.

La trasformazione dell'energia termica in energia meccanica avviene attraverso l'espansione dei gas prodotti dalla combustione, che hanno raggiunto valori elevati della temperatura e della pressione, o trasferendo il calore ad opportuni fluidi, primo fra tutti l'acqua, con formazione di vapore ad elevata temperatura che costituisce il veicolo per la produzione di energia meccanica o energia elettrica.

03.02 - **Le macchine a vapore**

Le potenzialità del vapore per produrre lavoro meccanico sono note sin dall'antichità. Nel 200 d.C. Erone di Alessandria, matematico, fisico e

ingegnere lo mise in evidenza ideando una turbina a vapore. Leonardo nel Rinascimento lo fece in un modo pirotecnico mediante un grande pentola ben chiusa e piena d'acqua, chiamata archituono che riscaldata esplodeva vistosamente.

I primi tentativi efficaci di utilizzare il vapore nelle attività umane risalgono al periodo a cavallo fra il Sei e il Settecento[2]. Anzitutto va ricordata l'attività del matematico, fisico e inventore francese Denis Papin, che intravide la possibilità di utilizzare il vapore per estrarre acqua dai pozzi delle miniere, per consentire la navigazione di un vascello contro vento, per muovere veicoli e per scagliare proiettili. Dalla costruzione di una pentola a pressione trasse l'ispirazione per formulare la prima teoria di una macchina funzionante per mezzo del moto alternativo di un pistone. Nel 1704 intraprese una navigazione in Germania sul fiume Fulda con un battello fornito di ruote a pale azionato con manovelle alle quali intendeva applicare una macchina a vapore. I barcaioli del fiume che intravedevano nel nuovo mezzo un pericoloso concorrente commerciale, manifestarono le loro ostilità con violenza distruggendolo. Confermando che il cammino del progresso è lastricato di insidie e ostilità.

Anche se la prima macchina a vapore funzionante è dovuta a Thomas Savery che già dalla fine del Seicento costruì una pompa atmosferica per l'estrazione dell'acqua dalle miniere, il primo motore termico lo si deve a Thomas Newcomen. Era costituito da un pistone che scorreva all'interno di un cilindro alimentato con il vapore prodotto da una caldaia che sollevava il pistone stesso cui era collegato un carico mediante un bilanciere. Verso la metà del Settecento furono introdotte delle modifiche essenziali da parte di James Watt che resero la macchina più agevole, rapida ed efficiente soprattutto per l'aggiunta di un dispositivo nel quale

fluiva il vapore condensandosi. L'ingresso di queste macchine, chiamate esotermiche perché l'energia viene prodotta al loro esterno, nel mondo del lavoro stava liberando l'industria dai vincoli derivanti dall'impiego delle risorse locali. Tuttavia si dovette aspettare sino al 1804 perché comparisse la prima locomotiva costruita per opera dell'ingegner Richard Trevithick. Pur essendo semplice, snella e spartana, riusciva a svolgere dignitosamente il suo ruolo di trasportare il carbone alla miniera di Penydarren nel Galles. L'esteso impiego delle locomotive decollò qualche anno più tardi grazie al lavoro dell'ingegner George Stephenson il quale aprì così una nuova epopea nel trasporto terrestre che avrebbe condizionato lo sviluppo della nostra società dai punti di vista, energetico, economico e ambientale.

Si stava così consolidando la struttura delle moderne macchine esotermiche, costituite da una caldaia nella quale si genera vapor d'acqua surriscaldato, che mediante un meccanismo di distribuzione agisce alternativamente sulle due facce di un stantuffo facendolo scorrere avanti e indietro in un cilindro chiuso alle due estremità, producendo così lavoro meccanico. Nella sostanza il vettore fluido, per lo più acqua, subisce una serie di trasformazioni termodinamiche in base alle quali dopo essere stata vaporizzata, riscaldata, espansa e decompressa torna condensando al punto di partenza. Il loro impiego si sarebbe protratto sino alla prima metà del Novecento; oggi alcune di tali locomotive si trovano custodite in musei per testimoniarne il livello tecnologico ed estetico dovuto alle loro decorazioni, tipiche di un'interessante epoca della storia. L'invenzione della macchina a vapore, sicuramente una delle più importanti nella storia dell'umanità, stava innescando in un crescendo vorticoso il decollo della rivoluzione industriale. Tutto ciò avviando processi produttivi innovativi che alimentavano lo sviluppo economico mediante una grande quantità

di risorse, energetiche e materiali. Purtroppo però aveva inizio anche l'emissione di notevoli quantità di rifiuti gassosi, liquidi e solidi che avrebbero inquinato l'ambiente naturale.

In realtà già dal 1798 Thomas Malthus aveva lanciato un monito sull'incombente pericolo del depauperamento delle risorse del pianeta e sul fatto che le attività produttive basate sul loro impiego avrebbero deteriorato profondamente l'ambiente. Prescindendo da questi inquietanti aspetti possiamo per ora osservare che l'esordio della rivoluzione industriale si può far risalire all'inizio dell'Ottocento, in uno scenario adeguato per stimolare l'interesse del giovane Sadi Carnot.

03.03 - Il rendimento delle macchine termiche

In termini generali una macchina termica riceve calore da una sorgente a temperatura elevata T_1, corrispondente alla sua caldaia, che fluisce verso una sorgente ad una temperatura più bassa T_2 passando attraverso un dispositivo in grado di attingere parte dell'energia in transito e trasformarla in energia meccanica. Ai tempi in cui Carnot si cimentava in questo problema era ancora vitale la teoria del calorico e non era ancora stato formulato il principio di conservazione dell'energia. Egli era però consapevole del fatto che in una trasformazione la somma delle energie termica e meccanica rimangono costanti, e che il calore fluisce spontaneamente dalla sorgente calda a quella fredda. Ciò premesso si proponeva di valutare il rendimento della macchina, espresso dal rapporto fra il lavoro meccanico ottenuto e il calore che proviene dalla sorgente calda, assumendo che tutte le trasformazioni in gioco fossero reversibili. Nella sua analisi ha dimostrato che esso non dipende dalle caratteristiche della macchina e dal fluido impiegato, ma solo dalla differenza di temperatura fra le due sorgenti,

giustificando così l'impiego del condensatore introdotto da Watt la cui presenza aumenta la differenza di temperatura. In realtà, grazie all'ipotesi di reversibilità, tale analisi fornisce il valore massimo del rendimento di una macchina termica la cui struttura interna non è precisata. Pertanto ne stabilisce il suo limite operativo.

Il concetto di rendimento introdotto da Carnot era destinato a coprire un ruolo di primo piano in tutti gli studi riguardanti le trasformazioni dell'energia che prendono come riferimento macchine operanti in condizioni di reversibilità. La presenza dell'irreversibilità, che crea entropia con una velocità tanto più elevata quanto più grande è quella delle trasformazioni in gioco, penalizza il rendimento della macchina come illustrato nella SCHEDA 4. Per tenerne conto si deve conoscere la velocità di creazione dell'entropia nei diversi processi coinvolti. I problemi e le difficoltà che si incontrano per effettuare questi calcoli sono illustrati in una interessante pubblicazione del 1948 di Richard Tolman e Paul C. Fine[3].

SCHEDA 4

È opportuno assumere che la macchina termica operi in condizioni stazionarie nelle quali i flussi di calore e lavoro si mantengono inalterati nel tempo per cui anche i valori della temperatura in ogni punto del sistema, pur essendo diversi fra di loro, rimangono a loro volta costanti nel tempo. Questa situazione, che si presenta in molti processi condotti dall'uomo perché conveniente e facile da gestire, non toglie generalità al risultato riassunto nella seguente semplice espressione del rendimento:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$$

Se indichiamo con σ_{irr} l'entropia prodotta per unità di tempo, compatibilmente con quanto riferito nella SCHEDA 2, risulta che l'espressione del rendimento deve essere riscritta come segue:

$$\eta = \frac{w}{q} = \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1}\right) - \left(\frac{\sigma_{irr}}{q} T_2\right)$$

essendo w il lavoro prodotto per unità di tempo e q il flusso di calore proveniente dalla sorgente calda. In sostanza al rendimento di Carnot dato dal primo termine al secondo membro si deve sottrarre un termine la cui entità è proporzionale alla velocità di creazione dell'entropia che a sua volta contiene i contributi dovuti alle diverse sorgenti di irreversibilità quali i flussi di calore, di materia e le reazioni chimiche.
La velocità σ_{irr}, con cui viene creata l'entropia è tanto più elevata quanto maggiore è l'irreversibilità del processo. In termini generali si può esprimere come segue:

$$\sigma_{irr} = \sum_k X_k \cdot J_k$$

X_k sono le forze generalizzate che riflettono i gradienti delle grandezze, quali la temperatura, le pressione e i potenziali chimici, che provocano le trasformazioni, mentre J_k sono i flussi ad esse coniugati. L'indice k si riferisce ai diversi processi che contribuiscono ad aumentare l'entropia, ovvero:

- Il trasporto globale di materia
- il trasporto dell'energia termica
- lo svolgimento delle reazioni chimiche
- dissipazione dell'energia meccanica

03.04 - Le macchine endotermiche

Il primato delle macchine a vapore nel trasporto è durato per tutto l'Ottocento e si è protratto anche nella prima metà del Novecento. Ma a partire dal secondo dopoguerra la loro egemonia venne usurpata dall'espansione delle linee elettrificate e dai motori endotermici. Infatti sin dall'inizio del Novecento si stava diffondendo una nuova invenzione che aveva la caratteristica di produrre l'energia termica internamente al motore mediante la combustione di una miscela gassosa detonante costituita da ossigeno e idrogeno, aria e idrogeno o aria e gas illuminante. L'accensione e lo scoppio della miscela veniva realizzata mediante una scintilla prodotta da un arco elettrico generato fra due elettrodi. Il calore liberato veniva trasformato in lavoro meccanico in seguito all'espansione dei gas combusti che agiva su un pistone mobile in un cilindro metallico a contatto con la stessa camera di combustione, mentre i gas prodotti dalla combustione venivano scaricati nell'ambiente.

Autori dell'invenzione furono un sacerdote, padre Eugenio Barsanti, ed un fisico di nome Felice Matteotti che già nel 1853 diedero una dettagliata descrizione del suo funzionamento in documenti e brevetti depositati in diversi paesi. Il primo motore a combustione interna fu però costruito da Jean J. Lenoir qualche anno dopo, mentre Eugen Langen e August Otto costruirono un motore verticale simile a quello di Barsanti ma meglio accessoriato che si impose in virtù del suo più elevato rendimento. Nello stesso periodo venne ideato il ciclo a quattro tempi nel quale in quattro corse del pistone la miscela, veniva compressa, accesa ed infine i gas combusti venivano scaricati. Questo ciclo, che è tuttora usato, ha segnato l'inizio della moderna costruzione dei motori a scoppio. Nel 1882 Karl Benz e Gottlieb Daimler, anche se preceduti di pochi mesi dall'italiano Enrico

Bernardi, costruirono il primo motore a scoppio che funzionava con un liquido facilmente vaporizzabile chiamato benzina ottenuto per distillazione del petrolio, che prima dell'avvento dei motori a scoppio aveva avuto sporadiche applicazioni nell'illuminazione, nel riscaldamento e per alcune sue doti terapeutiche.

Prima della fine dell'Ottocento l'ingegnere tedesco Rudolf Diesel brevettò un motore nel quale l'accensione della miscela avveniva per combustione spontanea grazie ad un aumento della pressione. In questi motori la benzina veniva sostituita da una frazione del petrolio meno volatile chiamata gasolio, o con oli vegetali, anticipando l'impiego dei biocarburanti. In realtà l'impiego di un elevato rapporto di compressione aumentava la resa del motore offrendo così un ulteriore vantaggio al suo impiego anche se all'inizio la sua applicazione era limitata ai grandi motori navali. L'applicazione ai motori terrestri avrebbe dovuto aspettare l'introduzione da parte di Bosch nel 1927 di una pompa meccanica per alimentare il combustibile liquido.

Pertanto l'alba del nuovo secolo teneva a battesimo la marcia trionfale di un veicolo che avrebbe condizionato il comportamento sociale del genere umano. Questi veicoli, battezzati automobili o autovetture, offrivano ampia libertà di movimento e in breve tempo sarebbero diventati largamente accessibili grazie all'affermazione di efficaci metodi di produzione. Gli sviluppi furono favoriti dalle iniziative dell'ingegnere americano Henry Ford, che introdusse la catena di montaggio in grado di produrre su larga scala un'autovettura semplice ed economica chiamata Ford T. Attualmente sulla faccia della terra circolano circa un miliardo di autovetture a testimonianza del successo di una fiorente attività produttiva.

Nei veicoli moderni il motore è una struttura molto complessa al cui interno sono presenti i condotti di alimentazione dell'aria e scarico dei

gas, i meccanismi di comando delle valvole, i dispositivi per l'accensione della miscela, i condotti di circolazione del liquido refrigerante e dell'olio lubrificante. Partendo dai prototipi originali i diversi modelli di autovetture si sono avvicendati con varianti che ne hanno radicalmente trasformata la struttura rendendola sempre più aerodinamica.

In un motore endotermico si può assumere ragionevolmente che le due temperature estreme, quella raggiunta dalla fiamma nella camera di combustione e quella dei gas di scarico si aggirino mediamente sui 2000°C e 150°C. In questo caso applicando la formula di Carnot risulta che il rendimento sfiora il valore di 0,8. I valori ottenuti dall'esame dei dati di funzionamento dei motori a scoppio risultano però significativamente minori poiché si aggirano intorno a 0,3. Questo risultato mette in evidenza la presenza di un grande spreco di energia.

Per concludere ci si deve chiedere sino a che punto risulti giustificato impiegare il concetto di efficienza mutuato dalla termodinamica. È sicuramente corretto dal punto di vista fisico perché esprime il rapporto fra due energie, ma in una analisi pi ù approfondita non può prescindere di includere gli aspetti economici che tengono conto del valore delle due forme di energia coinvolte, del costo degli impianti e della loro vita media.

03.05 - **Diavoli e micromotori**

Anche la scienza talora subisce il fascino esercitato da demoni dotati di capacità sovrannaturali. La priorità spetta a Cartesio che nel 1640 ha reso popolare un diavoletto che porta il suo nome, anche se la sua scoperta si deve all'italiano Raffaele Mangiotti, che maschera uno strumento impiegato per la misura della pressione dei liquidi. Più arcano appare il demone introdotto da Laplace nel 1814 dotato di una mostruosa intelligenza per cui

in ottemperanza ad un rigido determinismo scientifico se ad un dato istante conoscesse tutte le relazioni fra le entità di questo Universo sarebbe in grado di prevedere gli eventi futuri.

Maxwell nel 1867 immaginò un'esperienza ipotetica che metteva in discussione il secondo principio della termodinamica[4]. Consideriamo due recipienti separati da una saracinesca contenenti le molecole di un gas soggette all'agitazione termica e a reciproche collisioni. Esse possono raggiungere la saracinesca da entrambe le parti per cui Maxwell ipotizzò la presenza di un essere in grado di selezionarle, aprendo e chiudendo la saracinesca, in modo tale da lasciare fluire le più veloci, e quindi più calde, da una parte e le più lente, ovvero le più fredde, dall'altra, creando così una differenza di temperatura. Con buona pace del secondo principio. Eresie a parte Maxwell aveva colto che la sua validità non fosse assoluta, trattandosi di una legge statistica operante quindi a livello macroscopico. La sua ipotetica esperienza aveva però creato un enigma sul quale si sarebbero cimentati molti studiosi. Il tentativo più fruttuoso per esorcizzare il diavoletto fu compiuto nel 1929 da Leo Szilard, il fisico ungherese che unitamente a Einstein scrisse la famosa lettera a Roosevelt per sollecitarlo a promuovere le ricerche sull'energia nucleare. Nella sostanza il diavoletto per poter operare sulla saracinesca deve accumulare l'informazione che gli è richiesta per conoscere la posizione e la velocità delle molecole che si avvicinano alla saracinesca stessa. Il contenuto profondo di questa osservazione venne colto diversi anni dopo da parte di due scienziati che operavano alla IBM, Rolf Landauer e Charles Bennett, i quali osservarono che l'informazione non può essere accumulata al di sopra di un limite finito oltre il quale deve essere scaricata[5]. Ma la sua la cancellazione non è gratuita perché richiede una spesa di energia, in modo irreversibile

creando quindi una quantità di entropia pari a quella richiesta dal processo di rimescolamento delle molecole gassose per cui il secondo principio è salvo. Queste analisi, che peraltro dimostrano che l'informazione ha un contenuto fisico, avrebbero costituito un punto di svolta nella teoria dell'informazione, mettendo in rilievo i suoi legami con la termodinamica.

Infine è interessante ricordare anche che nel suo primo volume delle lezioni di fisica Richard Feynman esplora la possibilità di ottenere lavoro meccanico utilizzando le fluttuazioni di energia presenti in un gas, utilizzando un dispositivo costituito da un asse cilindrico messo in rotazione per effetto delle collisioni delle molecole su pale innestate sull'asse stesso. La rotazione può però avere luogo in una sola direzione per la presenza di un nottolino di arresto che agisce su una ruota dentata montata a sua volta sull'asse. Il dispositivo così costruito dovrebbe essere in grado di trasformare l'energia casualmente distribuita nei movimenti molecolari nell'energia meccanica di rotazione dell'albero. In questa esperienza non verrebbe violato il primo principio della termodinamica poiché per mantenere il gas a temperatura costante sarebbe necessario alimentarlo continuamente con energia termica, ma verrebbe violato il secondo principio. Fruendo della legge proposta da Boltzmann in base alla quale la probabilità che una molecola abbia un particolare valore dell'energia diminuisce esponenzialmente all'aumentare della temperatura Feynman dimostra che affinché la macchina sia in grado di operare è necessario separare in due vani la parte dell'albero su cui sono innestate le pale da quella che contiene la ruota dentata con il nottolino d'arresto, mantenendole a temperature diverse. In queste condizioni è possibile trasformare l'energia termica in energia meccanica con un rendimento però compatibile con la formula di Carnot che risulta così confermata anche su scala microscopica.

L'ENERGIA ELETTROMAGNETICA

04.01 - La parola agli Dei

Dell'esistenza dell'elettricità e del magnetismo e delle forze ad essi sottostanti esistono tracce sin dall'antichità ma lo studio sistematico delle loro interazioni è iniziato solo nell'Ottocento grazie ai lavori di Hans Christian Oersted, André-Marie Ampère e soprattutto Michael Faraday, il più grande perché ha dominato il panorama delle scienze fisiche e chimiche del primo Ottocento.

Il punto di partenza è la constatazione dell'esistenza di due campi di forze, uno elettrico che si riferisce alle interazioni attrattive o repulsive fra particelle elettricamente cariche quali gli elettroni o gli ioni, ovvero atomi cui sia stato strappato uno o più elettroni, ed uno magnetico che si riferisce alle interazioni fra oggetti bipolari come le calamite. Esse sono costituite da materiali, quali l'ossido ferroso chiamato magnetite, che hanno due poli chiamati nord e sud poiché non esistono, o almeno non sono mai stati trovati, monopoli magnetici. L'azione di un campo elettrico su particelle elettricamente cariche quali gli elettroni ne provoca un flusso caratterizzato dalla direzione e l'intensità della corrente, espressa dalla carica che fluisce per unità di tempo e superficie perpendicolare alla direzione del flusso stesso. Il lavoro effettuato per spostare una carica elettrica unitaria fra due punti in uno spazio in cui sia presente un campo elettrico viene definito differenza di potenziale.

A Maxwell spetta il merito di avere espresso in forma matematica una sintesi dei lavori sino ad allora svolti, introducendo alcune profonde innovazioni, in un'opera pubblicata nel 1873 dal titolo "*Trattato sull'elettricità e il magnetismo*". Per conseguire tale risultato fu costretto ad ampliare

il linguaggio della fisica matematica per renderla in grado di gestire la complessità dei fenomeni elettromagnetici. Il risultato è compendiato in quattro equazioni con le quali gli studenti decorano le loro *T-shirt*. Anche se hanno un aspetto per iniziati, meritano di essere menzionate. Almeno per tre ragioni: la prima per offrire al lettore l'opportunità di decorare il suo abbigliamento, la seconda per invitarlo ad approfondirne il significato ed infine per il fatto non trascurabile che vengono attribuite a Dio.

$$\nabla \bullet \boldsymbol{D} = \rho$$

$$\nabla \bullet \boldsymbol{B} = 0$$

$$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial t}$$

$$\nabla \times \boldsymbol{H} = \frac{\partial \boldsymbol{D}}{\partial \mathrm{t}} + \boldsymbol{J}$$

Le prime due si riferiscono alla situazione statica, in particolare la prima stabilisce in che modo il campo elettrico $\boldsymbol{E(D)}$ è connesso con la distribuzione delle cariche elettriche presenti nel sistema espressa dal valore della sua densità ρ. Le terza e la quarta colgono le caratteristiche dinamiche che intercorrono fra campi elettrico e magnetico $\boldsymbol{B}$ fra di loro complementari, poiché ad un campo magnetico variabile nel tempo sono associati degli anelli, o meglio delle rotazioni di un campo elettrico[1]. Analogamente alla variazione nel tempo di un campo elettrico è associata la rotazione di un campo magnetico. Le equazioni sono scritte fruendo di un particolare artificio matematico, tecnicamente un operatore chiamato rotore indicato con $\nabla\times$. Esso caratterizza geometricamente, o meglio vettorialmente, i campi rotanti che si manifestano su un piano perpendicolare alla direzione in cui ha luogo la variazione nel tempo del campo ad esso complementare, chiudendosi a cerchio o meglio arrotolandovisi intorno. In assenza di cariche

elettriche il termine J, che ne esprime il flusso, della quarta equazione è nullo per cui si presenta una simmetria fra le equazioni del campo elettrico e magnetico. Essa viene però infranta dalla presenza di cariche elettriche che danno luogo ad una corrente la cui entità è espressa dalla J della quarta equazione. Un termine equivalente non è presente nella terza equazione poiché non esistono particelle aventi la caratteristiche degli elusivi monopoli.

04.02 - **Fiat lux**

In assenza di cariche elettriche, Maxwell riuscì a manipolare la terza e la quarta equazione in modo tale da separare i due campi, ottenendone altre due simili fra di loro esprimenti rispettivamente la variazione nel tempo e nello spazio del campo elettrico e del campo magnetico[2]. L'aspetto eccitante era costituito dal fatto che entrambe avevano la forma di un'equazione già nota, descrivente il moto delle onde, dovuta a Jean Baptiste Le Rond d'Alembert, filosofo francese che diede notevoli contributi alla fisica matematica.

Se si getta un sasso in uno stagno l'acqua viene disturbata e dal punto di contatto si dipartono delle onde concentriche che si allargano sulla superficie con una ben definita velocità. In realtà il disturbo riguarda moti verticali periodici del liquido, come si può verificare osservando una foglia galleggiante che si alza e si abbassa mantenendo la stessa posizione sul piano orizzontale dello stagno. Quella che viene trasportata nella direzione di propagazione non è la materia ma l'energia. Queste onde vengono chiamate trasversali, ma esistono anche onde longitudinali che hanno luogo in un gas che viene sollecitato da una successione di compressioni e rarefazioni che si svolgono nella direzione di propagazione.

Un'onda costituisce pertanto una perturbazione periodica che si propaga in un mezzo elastico ed i suoi caratteri distintivi sono la velocità di propagazione, la frequenza, ovvero il numero di volte che in un punto dello spazio si ricuperano le stesse condizioni fisiche, e la lunghezza d'onda che esprime la distanza fra due perturbazioni successive. Le inaspettate onde ottenute dalle equazioni di Maxwell non si riferiscono a disturbi dell'acqua o di un qualsivoglia materiale, ma alle oscillazioni di un campo elettrico ed uno magnetico nel vuoto, perpendicolari fra di loro e perpendicolari alla direzione di propagazione. Il prodotto fra la frequenza ν e la lunghezza d'onda λ fornisce la velocità di propagazione c che costituisce una costante universale della fisica. In sostanza ne emerge la descrizione unitaria di una gamma di radiazioni ciascuna caratterizzata dal valore della frequenza. Al suo aumentare emergono in successione le onde:

- **radio,** coinvolte nelle comunicazioni,
- **infrarosse,** coinvolte nei fenomeni termici perché provocano le vibrazioni degli atomi,
- **luminose,** che colpiscono la retina dell'occhio producendo la visione,
- **ultraviolette,** hanno potere ionizzante e battericida,
- **raggi X,** applicati nella diagnostica medica,
- **raggi γ,** di origine nucleare.

Quindi "*Fiat lux*", ma soprattutto complimenti a Maxwell che con le sue equazioni ha saputo cogliere un così eccezionale risultato.

04.03 - Una nuova rivoluzione industriale

Michael Faraday, rivelandosi un buon profeta, aveva comunicato a lord Gladstone che sull'elettricità si sarebbero pagate le tasse. I presupposti per una sua ampia applicazione erano contemplati dai fenomeni fisici

alla cui scoperta aveva dato un significativo contributo. In particolare era ormai ben noto che una corrente elettrica produce un campo magnetico, un campo magnetico in moto produce una corrente elettrica ed infine due campi magnetici presenti in due oggetti materiali diversi sono soggetti ad una forza dalla quale si può ottenere lavoro meccanico.

La storia delle applicazioni dell'elettricità corre su binari paralleli alla scoperta delle altre fonti di energia anche se non mancano i punti di incontro. Tuttavia prima che venisse impiegata su larga scala trascorse un periodo di incubazione, durante il quale sono state condotte le esperienze e sviluppate le teorie richieste per realizzarne le applicazioni tecnologiche. Allo svolgimento di queste attività contribuì in modo determinante la disponibilità di un generatore statico di energia elettrica costruito nel 1799 da Alessandro Volta.

La prima importante realizzazione industriale dalla nuova forma di energia è stata la dinamo mediante la quale si genera una corrente elettrica da un lavoro meccanico ottenuto ad esempio da una macchina a vapore. Un suo prototipo fu costruito dall'italiano Antonio Pacinotti, geniale fisico pisano, ma fu l'inventore belga Zénobe Théophile Gramme che la perfezionò e ne promosse lo sviluppo industriale. La sua utilità conseguiva anche dal fatto, scoperto per caso da Gramme, che poteva essere impiegata in modo reversibile sia come generatore di corrente elettrica sia come motore per compiere lavoro meccanico. Nel 1878 Gramme costruì il primo impianto nel quale una dinamo, messa in moto dal flusso dell'acqua del fiume Marna, trasmetteva potenza elettrica a due altre dinamo che si trovavano a sei chilometri di distanza. Con questa iniziativa decollò anche l'impiego su larga scala di una notevole risorsa di energia naturale, quella idrica, che sino ad allora aveva solo ricevuto applicazioni locali di modesta entità.

In breve tempo seguì una cascata di invenzioni e realizzazioni pratiche che diedero impulso alle applicazioni dell'elettricità di cui è difficile seguire la cronologia. In particolare l'elettrificazione delle linee ferroviarie da parte di Werner von Siemens e l'impiego della corrente alternata che contribuì all'utilizzo dell'energia elettrica nella trazione. Queste applicazioni fruirono dell'invenzione di Galileo Ferraris del motore elettrico a induzione di corrente, successivamente sviluppato da Nikola Tesla, uno statunitense di nascita iugoslava.

Al dilagante impiego dell'energia elettrica contribuì in modo determinante l'invenzione di Thomas Alva Edison della lampadina a filamento incandescente. La sua applicazione su ampia scala è associata alla fioritura di un periodo storico che precedette la prima guerra mondiale, chiamato *Belle Epoque*, nel quale le invenzioni e i progressi della tecnologia erano all'ordine del giorno. Essi venivano celebrati nel *Ballo Excelsior*, rappresentato nei teatri di Parigi battezzata *Ville Lumière* grazie al contributo dell'elettricità.

Un aspetto che avrebbe influito in modo radicale sullo sviluppo culturale e tecnologico della società umana deriva dall'applicazione delle onde elettromagnetiche. Previste teoricamente dal grande Maxwell e confermate sperimentalmente da Rudolf Heinrich Hertz, vennero utilizzate per la prima volta da Guglielmo Marconi nel 1895. Le sue esperienze sulla loro trasmissione nell'etere a lunga distanza sarebbero culminate con l'invenzione della radio che avrebbe aperto i nuovi ed ampi orizzonti delle telecomunicazioni.

Attualmente la quantità di energia elettrica utilizzata nel mondo corrisponde a più del 30% del consumo totale di energia. Viene prodotta per via termoelettrica dalle fonti fossili, dalle fonti idroelettriche, dalla fonte

nucleare, ed infine con un minor contributo dalle fonti eolica e solare.

L'utilizzazione dell'energia potenziale immagazzinata dall'acqua negli invasi fluviali ha raggiunto un notevole livello di maturità grazie alla tipologia delle diverse turbine impiegate per trasferire l'energia cinetica delle correnti fluide ad un generatore di corrente elettrica. Il rendimento di una macchina idraulica varia tra il 65% e il 95% per cui i costi dell'energia prodotta sono tra i più bassi. Purtroppo la carenza di risorse idriche ne sta limitando l'impiego anche se è stato stimato che introducendo sbarramenti su ogni fiume presente sulla Terra sarebbe possibile ottenere poco meno di un terzo dell'energia impiegata nel mondo. In Italia, la fonte idroelettrica rappresenta la quota predominante delle energie rinnovabili, ma purtroppo non se ne prevede un sostanziale incremento.

04.04 - **Una profonda rivoluzione scientifica**

I docenti avevano anticipato al giovane Max Planck che nella professione del fisico che stava intraprendendo rimaneva solo l'incombenza di affinare la precisione delle costanti fisiche note, perché i problemi più importanti erano già stati risolti. Paradossalmente gli spettò il compito di far decollare una dirompente rivoluzione scientifica che avrebbe profondamente trasformato non solo la fisica ma l'intera cultura moderna[3].

Infatti nel 1900 Planck offrì una soluzione dello spinoso problema, detto del corpo nero, riguardante la distribuzione dell'energia fra le diverse frequenze di una radiazione in equilibrio, di cui erano noti dati sperimentali molto accurati poiché risultavano di interesse per la costruzione di impianti di illuminazione. L'andamento delle curve sperimentali presenta un massimo per poi scendere verso lo zero all'aumentare della frequenza, mentre secondo la teoria elettromagnetica avrebbero dovuto aumentare

senza limiti. La teoria proposta da Planck riusciva a simulare con grande precisione i dati sperimentali purché si assumesse che l'energia associata alla radiazione venisse emessa in quantità discrete, o quanti, proporzionali alla frequenza della radiazione stessa. Quindi uguali a 0, vh, $2vh$, $3vh$ e così via, essendo h una nuova costante fisica. Nel modello di Planck il corpo emittente era concepito come l'insieme di un gran numero di oscillatori ciascuno dei quali emette la radiazione con la stessa frequenza con la quale vibra e la sua energia assume solo valori quantizzati. Questa ipotesi venne accettata con riserva ritenendo che la quantizzazione fosse in atto solo nei processi di assorbimento ed emissione, mentre una volta decollata nello spazio la radiazione riassumesse il respiro delle onde elettromagnetiche.

Fu Albert Einstein a fare precipitare la situazione dimostrando che in accordo al modello di Plank la radiazione presentava le caratteristiche di un gas e quindi come tale doveva possederne gli atomi. Atomi di luce che sono stati battezzati fotoni. Con ciò veniva ufficialmente avviata la meccanica quantistica che avrebbe in breve dominato tutta la fisica e le scienze ad essa connesse come la chimica, anche se Einstein, con un tardivo pentimento, l'avrebbe successivamente abiurata.

I nuovi protagonisti dei processi energetici che coinvolgono le radiazioni elettromagnetiche diventavano i fotoni che scambiavano energia con gli elettroni e con gli atomi attraverso collisioni. Inoltre qualunque oggetto, fotone, elettrone, atomo, palla da tennis e così via può occupare solo stati quantici cui corrispondono valori discontinui dell'energia. La differenza di energia fra due di essi dipende dalle dimensioni poiché per gli oggetti macroscopici gli stati sono molto ravvicinati per cui l'energia si avvicina al comportamento di una grandezza continua. Per gli oggetti di scala atomica la differenza fra le energie di due stati è elevata ed interviene

specificamente nei fenomeni in cui essi sono coinvolti. In questo quadro acquista particolare interesse il comportamento di oggetti formati da gruppi di atomi di dimensioni crescenti, chiamati *quantum dots*, nei quali i processi di assorbimento ed emissione di energia possono essere calibrati sulla base delle loro dimensioni attraverso opportune leggi di scala.

Richard Feynman ha dichiarato: "Credo di poter dire con sicurezza che nessuno comprende la meccanica quantistica". Non possiamo che dargli atto constatando però che malgrado i suoi aspetti inquietanti gran parte dei prodotti delle attività industriali moderne quali l'energia nucleare, il laser, i semiconduttori, le comunicazioni, il calcolo elettronico ed altri, sono basati sulle sue applicazioni. Incluse, come vedremo, alcune applicazioni riguardanti la cattura e la trasmissione dell'energia.

04.05 - Il processo fotovoltaico

I semiconduttori sono solidi nei quali la resistenza al trasporto degli elettroni sotto l'azione di un campo elettrico diminuisce con la temperatura. Questo comportamento, che li distingue dai metalli nei quali gli elettroni godono di una elevata mobilità, è dovuto al fatto che gli stati quantici da loro occupati si accumulano in due bande dette rispettivamente di valenza, ad energia inferiore, e di conduzione, ad energia superiore. Fra di esse esiste un intervallo $\Delta\varepsilon$, o *gap*, di valori dell'energia che risultano proibiti perché non possono essere occupati dagli elettroni. Pertanto per partecipare al trasporto della corrente elettrica un elettrone deve essere eccitato per effetto dei moti termici dalla banda di valenza, che è prossima alla saturazione, a quella di conduzione, sostanzialmente vuota, dove acquista la mobilità necessaria per dare luogo ad una corrente elettrica. Gli elementi che si comportano come semiconduttori sono il germanio e il silicio che ha

acquistato un ruolo fondamentale nella tecnologia moderna[4].

Il comportamento dei semiconduttori può essere modulato aggiungendo, o drogandoli come si dice normalmente, piccole quantità di un elemento che abbia la tendenza a cedere o acquistare elettroni. Nel primo caso il semiconduttore possiede un eccesso di elettroni e il drogaggio si dice di tipo n mentre nel secondo ne possiede un difetto si dice di tipo p. In corrispondenza della superficie di contatto fra i due semiconduttori rispettivamente n e p, chiamata giunzione, si manifesta una differenza di potenziale elettrico dovuto allo squilibrio fra le densità degli elettroni presenti nei due materiali. Si potrebbe allora, fantasticando, ritenere che essi possano generare in un circuito esterno un flusso di elettroni dal quale ricavare del lavoro. Purtroppo l'energia non si crea dal nulla per cui il sistema raggiungerebbe rapidamente una nuova posizione di equilibrio dopo il depauperamento dei pochi elettroni che si trovano in uno stato eccitato. A questa situazione si può rimediare se il solido viene irradiato con un flusso di fotoni aventi un'energia superiore a quella del gap del semiconduttore e quindi in grado di eccitare alcuni elettroni dalla banda di valenza lasciando delle lacune positive che si comportano come particelle positive. La banda di conduzione viene continuamente alimentata con elettroni per cui si mantiene il flusso elettrico da cui ricavare lavoro. Non più gratis perché viene alimentato dall'energia della radiazione. Questo processo scoperto da Becquerel nel 1939 viene chiamato fotovoltaico e sta alla base della costruzione delle moderne celle fotovoltaiche presenti nei pannelli nei quali l'energia solare viene trasformata in energia elettrica in seguito all'eccitazione degli elettroni del materiale solido per effetto dei fotoni della radiazione.

In sostanza l'energia della radiazione viene convertita in energia elettrica

e l'intensità della corrente che fluisce nel circuito elettrico è espressa dalla differenza fra la velocità di formazione delle coppie elettrone-cavità diminuita dalla velocità della loro ricombinazione attraverso processi che non emettono radiazioni perché l'energia viene dispersa sotto forma di calore, e radiativi perché viene restituita sotto forma di fotoni. L'efficienza delle celle fotovoltaiche, espressa dal rapporto fra l'energia elettrica ottenuta e quella solare incidente, è determinata dai processi di separazione e di ricombinazione dei trasportatori di carica che dipende dalle caratteristiche chimiche e fisiche dei materiali impiegati.

SCHEDA 5

Una cella solare può essere assimilata ad una macchina termica[5] il cui rendimento si valuta con la formula riportata nella SCHEDA 4. La temperatura T_1 corrisponde a quella del gas fotonico in equilibrio con la temperatura della superficie solare (6000K). La velocità di creazione irreversibile di entropia si scrive come segue:

$$\sigma_{irr} = \sigma_c + \sigma_{kin} + \sigma_{ott}$$

dove i termini al secondo membro esprimono rispettivamente il raffreddamento, o termalizzazione del gas fotonico, il decadimento spontaneo degli stati eccitati e l'espansione del gas incidente. Globalmente il rendimento non supera il 30%.

04.06 - Il miracolo verde

L'attenzione verrà ora posta sui processi che riguardano lo scambio di energia fra i fotoni e gli elettroni presenti in un sistema molecolare, con successiva utilizzazione dell'energia scambiata per promuovere particolari trasformazioni chimiche. Questi processi nei quali l'elettromagnetismo si incontra con la chimica riguardano gran parte delle trasformazioni che si svolgono in natura, in particolare nei sistemi biologici. In questo quadro una posizione di rilievo spetta alla fotosintesi[6], nella quale ha luogo la conversione dell'energia luminosa proveniente dal sole in energia chimica attraverso la reazione globale:

$$6\,CO_2 + 6\,H_2O + \mathrm{n}\,h\nu \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6\,O_2$$

nella quale intervengono **n** fotoni indicati con $h\nu$. Il processo avviene in organelli presenti nelle cellule vegetali, chiamati cloroplasti, nei quali sono presenti complessi proteinici formati da decine di migliaia di atomi per lo più di carbonio, idrogeno ed azoto. Ha luogo la scissione dell'acqua e la cattura dell'anidride carbonica presente nell'aria ed avente come risultato la fabbricazione delle molecole dei carboidrati che hanno un alto contenuto di energia e basso contenuto di entropia, quindi elevata qualità. Inoltre sono i principali costituenti degli organismi vegetali. L'ossigeno molecolare presente nell'atmosfera, che respiriamo e che sta alla base di molte trasformazioni che hanno avuto e hanno tuttora luogo sul nostro pianeta, è stato prodotto è protratto per centinaia di milioni di anni. In realtà l'origine dei processi fotosintetici è ancestrale poiché risale a più di tre miliardi di anni fa e si sovrappone con l'origine della vita sulla terra, poiché era già presente in organismi primordiali chiamati cianobatteri in una forma più semplice di quella attuale per cui si è evoluta in simbiosi con l'evoluzione

della vita stessa.

Il processo fotosintetico globale si svolge in due stadi chiamati rispettivamente **luminoso**, dove ha luogo la cattura dell'energia elettromagnetica proveniente dal sole e **oscuro**, dove ha luogo la sintesi dei carboidrati. Tutto ciò grazie all'intervento di due combustibili molecolari indicati rispettivamente con le sigle ATP e NADPH, non specifici della fotosintesi poiché sono i principali trasportatori di energia all'interno delle cellule. Sono entrambi molecole con elevato contenuto energetico che vengono coinvolte in reazioni che possono essere condotte in entrambi i sensi, assorbendo o liberando l'energia necessaria per guidare le reazioni biochimiche. L'ATP, il cui nome è adenosintrifosfato, deve il suo elevato contenuto energetico alla presenza di tre molecole di acido fosforico. Con acqua dà luogo ad una reazione di idrolisi nella quale si libera una molecola di acido fosforico con la formazione di ADP unitamente all'energia impiegata per promuovere un'altra reazione. In modo analogo agisce l'NADPH ed entrambi hanno una funzione specifica nella zona oscura della fotosintesi nella quale si formano gli idrati di carbonio.

Nel processo luminoso la reazione avviene in senso inverso poiché l'ADP si trasforma in ATP a spese dell'energia catturata dal sole. Il processo si svolge grazie all'intervento di un centro catalitico avente una tipica struttura cubica formata da quattro atomi metallici, tre di manganese e uno di calcio, che possiede la peculiare capacità di aumentare la velocità di scissione delle molecole di acqua attraverso la reazione seguente, con formazione di una molecola di ossigeno e di due elettroni e^-:

$$H_2O \rightarrow 0{,}5\ O_2 + 2H^+ + 2e^-$$

La sua azione è completata da due macchine molecolari chiamate fotosistema I e fotosistema II formate da decine di migliaia di atomi[7]. Gli

elettroni prodotti dalla dissociazione dell'acqua vengono eccitati dall'energia dei fotoni catturata dalle molecole di clorofilla per cui, come fossero delle patate bollenti, vengono scagliati, o meglio trasferiti, nei fotosistemi dove cedono la loro energia per trasformare l'ADP in ATP. In realtà a metà del tragitto gli elettroni subiscono un'ulteriore eccitazione che in questo caso trasforma una molecola di NADP in NADPH, che è in grado di attivare con efficienza reazioni che implicano un trasferimento di energia ad un livello più elevato. Ne risulta un cammino a zig-zag che viene chiamato schema Z.

In questo quadro piuttosto complicato la clorofilla, che costituisce la molecola avente il compito di raccogliere le radiazioni luminose, pur essendo vorace si rifiuta di assorbire i fotoni solari corrispondenti alla frequenza del colore verde. Essi vengono quindi riflessi ed arrivano ai nostri occhi, conferendo così alla vegetazione quel tipico colore che costituisce il simbolo di ogni movimento ecologico. L'estrazione degli elettroni avviene infatti in minute strutture verdi presenti nelle cellule delle foglie dove la clorofilla è racchiusa in uno straordinario sistema di membrane presenti nell'interno dei cloroplasti. Si tratta di pile di dischi appiattiti che perlustrano il mondo come la centrale elettrica di un pianeta alieno, collegati fra di loro mediante tubi volanti che si incrociano a tutti gli angoli e tutte le altezze. In tali dischi si svolge il lavoro della fotosintesi che si manifesta attraverso l'estrazione di elettroni dall'acqua.

Ma dopo questo tocco fantascientifico affrontiamo la realtà: qual è il rendimento del processo espresso come rapporto fra l'energia catturata e quella incidente sulle foglie? Come illustrato nella SCHEDA 6 è dell'ordine dell'uno percento. Molto basso, ma non dobbiamo dimenticare che il processo fotosintetico svolge un ruolo di alta qualità attraverso la sintesi

dei carboidrati. Pertanto la sua caratteristica è la capacità di selezionare dalla copiosa radiazione solare quelle frequenze che risultano più adatte per alimentare un processo che sta alla base dei fenomeni vitali. La menzionata bassa efficienza è compatibile con il fatto che le macchine molecolari biologiche sono il prodotto della selezione naturale che favorisce le strutture complesse facilmente adattabili. Infatti esse comportano maggiori connessioni, maggiore varietà ed una più elevata gerarchia con un conseguente aumento nel consumo dell'energia. In sostanza l'aumento della complessità strutturale e funzionale comporta una minore efficienza nell'impiego dell'energia nel produrre lavoro di qualunque natura.

SCHEDA 6

Il rendimento del processo fotosintetico, espresso dal rapporto fra l'energia catturata e quella incidente, può essere espresso come segue[8] :

$$\eta_{foto} \approx \left(1 - \frac{T_0}{T_s}\right) - \frac{k_B T_0}{\Delta\varepsilon} \ln \frac{1}{1 - \varphi}$$

dove T_0 è la temperatura del sistema, T_S quella della superficie solare, $\Delta\varepsilon$ la variazione di energia associata all'eccitazione elettronica e k_B la costante di Boltzmann. φ è la resa quantica espressa dal rapporto fra il flusso di elettroni utilizzati e quello dei fotoni assorbiti. L'equazione presenta un'analogia con quella presente nella SCHEDA 3. Il primo termine al secondo membro esprime il rendimento di Carnot che risulta elevato essendo T_S molto alta che viene però penalizzato dal secondo termine. Gli organismi vegetali si sono evoluti verso complessi sistemi pigmento-proteina nei quali la resa quantica φ relativa alla cattura di quella parte della radiazione che ha le frequenze più opportune per i processi successivi risulta prossima all'unità, ma paradossalmente questo fatto contribuisce a diminuire il valore globale del rendimento che si aggira intorno ad 1%.

LA CHIMICA DELLE FORZE

05.01 - Una nuova forma di energia

All'Italia spetta il merito di avere tenuto a battesimo quel settore scientifico nel quale la chimica si fonde con l'elettricità. L'elettrochimica è nata nel 1791 con una pubblicazione di Luigi Galvani professore di fisiologia presso l'Università di Bologna dal titolo *"Commenti sulle forze elettriche nel moto muscolare"*. Attraverso una serie di esperimenti dimostrava che nei muscoli di una rana si producono delle contrazioni quando le cosce e i nervi lombari vengono collegati mediante un arco formato da due metalli in modo tale da realizzare un circuito chiuso. Ne dedusse l'esistenza di un fluido elettrico animale localizzato nei muscoli.

Questa teoria suscitò diverse reazioni da parte del mondo scientifico e indusse Alessandro Volta a condurre una serie di esperimenti che avrebbero ampliato in modo significativo tale scienza esordiente, sia pure aprendo un dibattito che si sarebbe trascinato per molto tempo. Alessandro Volta era professore di Fisica Sperimentale presso l'Università di Pavia; di nobile casato si era affermato per la sua cultura e la sua ingegnosità sperimentale. A suo credito si doveva già ascrivere l'invenzione di un elettroforo, ovvero di un generatore elettrostatico in grado di accumulare modeste quantità di carica elettrica, e la scoperta del metano. Nel ripetere le esperienze di Galvani avanzò riserve sull'esistenza di una elettricità animale, ipotizzando che le contrazioni dei muscoli della rana fossero dovute al contatto fra due metalli diversi. In sostanza le cosce della rana non sarebbero state la fonte di un'elettricità animale ma una sorta di strumento di misura.

Ne emerse un conflitto che divise il mondo scientifico e nel cui contesto nacque l'invenzione della pila. Si trattava di uno strumento basato su

una catena di coppie di dischi di zinco e rame, interposti con dischetti di cartoncino imbevuti di acqua salata e disposti in modo tale che l'accoppiamento in serie consentisse di sommarne i potenziali. Grazie alla pila risultava possibile produrre una corrente elettrica e quindi rendere disponibile ai ricercatori uno strumento mediante il quale avrebbero potuto approfondire le caratteristiche della nuova forma di energia. L'invenzione di Volta suscitò vivo interesse nel mondo scientifico europeo e avviò una febbrile attività di ricerca. Nel 1801 si recò a Parigi per presentare il suo apparecchio dove fu ricevuto con tutti gli onori da Napoleone che lo nominò senatore del Regno d'Italia e gli conferì il titolo di conte.

L'elettrochimica era decollata e molti altri personaggi avrebbero contribuito al suo sviluppo fra i quali merita di essere menzionato il chimico inglese Humphrey Davy, predecessore di Faraday alla Royal Institution, che correttamente individuò la fonte dell'energia elettrica nello svolgimento di una reazione chimica. In primo piano pose l'attenzione sul rapporto fra le forze elettriche e quelle chimiche che tengono uniti gli atomi nelle molecole facendo rientrare questa teoria in una visione più generale di respiro filosofico. Anche lui fu insignito da Napoleone con il titolo di conte, dimostrando che a quei tempi il lavoro scientifico costituiva una buona carta di credito per acquistare nobiltà. E ciò anche se i rivoluzionari francesi che avevano preceduto il munifico generale ne avessero messo in discussione il valore, spesso in modo cruento.

05.02 - La natura dei processi elettrochimici

Se si immerge in acqua un pezzo di metallo, ad esempio di zinco ***Zn,*** alcuni atomi depauperati di un elettrone, quindi sotto forma di ioni positivi, si sciolgono lasciando i loro elettroni nel metallo. Il processo crea uno

sbilanciamento di cariche elettriche fra il solido e la soluzione che si manifesta attraverso una differenza di potenziale elettrico. Il processo avviene anche in senso inverso, per cui se si immerge una sbarretta di rame Cu in una soluzione contenente ioni di rame Cu^{2+} parte di essi possono aderire alla superficie solida caricandola positivamente e creando anche in questo caso uno sbilanciamento di cariche elettriche ma in senso inverso al precedente. Gli ioni provengono dalla dissociazione di un sale di rame, ad esempio il solfato, che lascia in soluzione ioni negativi garantendo la neutralità elettrica del sistema globale[1].

Le superfici su cui avvengono i processi di dissoluzione e deposizione vengono chiamate elettrodi, anodo quello negativo e catodo quello positivo, mentre la soluzione che li contiene viene separata opportunamente in due zone in modo tale da permettere il trasporto di ioni limitando però il mescolamento fra le zone stesse. Esternamente i due metalli sono collegati da un circuito in grado di raccogliere la corrente elettrica e di estrarre lavoro. Si tratta di una situazione simile a quella presente in ciascuno degli elementi della pila di Volta. L'energia richiesta per produrre il lavoro elettrico viene fornita dalla reazione chimica in virtù della quale lo zinco si scioglie e il rame si deposita.

SCHEDA 7

Se la trasformazione che ha luogo in una pila si svolge in condizioni di reversibilità il lavoro elettrico, massimo, risulta espresso dalla variazione di energia libera:

$$W_{el} = \Delta F = \Delta U - T\Delta S$$

Ne deriva:

$$W_{el} = q\Delta V = \Delta F$$

per cui il lavoro elettrico è espresso dal prodotto della differenza di potenziale ΔV per la carica q trasportata.

Il dispositivo descritto costituisce un prototipo di cella elettrochimica, o galvanica, nella quale si ottiene lavoro elettrico da una reazione chimica dove lo zinco metallico si trasforma in cloruro di zinco e il cloruro di rame presente nella soluzione deposita rame metallico sul solido.

05.03 - Le celle a combustibile

Le celle a combustibile, o *fuel cells*, sono dei dispositivi elettrochimici inventati nel 1839 da Sir William Grove, uno scienziato dilettante che esercitava la professione di avvocato. Per lungo tempo l'interesse nei loro riguardi ha ristagnato, sinché nella seconda metà del secolo scorso vennero rispolverate per eventuali applicazioni che risultassero compatibili con le istanze energetiche che stavano affiorando. In particolare nel 1960 hanno trovato un impiego nelle esplorazioni spaziali.

Nelle celle a combustibile ha luogo una reazione di combustione nella quale l'idrogeno si combina con l'ossigeno per formare acqua liquida[(2)]. La reazione avviene però a temperatura ordinaria grazie alla presenza di un opportuno catalizzatore costituito da un solido che aumenta la velocità del processo. Il tutto avviene in un reattore nel quale sono presenti due elettrodi divisi da una soluzione in grado di trasferire gli ioni idrogeno. Gli elettrodi sono costituiti da un materiale poroso che supporta il catalizzatore, comunemente costituito da particelle di platino che, lambito dai due gas, aumenta la velocità della loro dissociazione e delle successive reazioni che avvengono come segue:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^- \qquad \textit{all'anodo}$$

$$\left.\begin{array}{l} (1/2)O_2 \rightarrow O \\ O + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O \end{array}\right\} \textit{al catodo}$$

Gli elettroni e^- separati all'anodo fluiscono nel circuito esterno, producendo lavoro, per ritornare al catodo dove contribuiscono alla formazione dell'acqua.

Il rendimento di una pila a combustibile reversibile sfiora l'unità ed è pertanto più elevato di quello di una macchina termica che operi con la stessa reazione di combustione. Questo risultato ha fatto nascere aspettative sul loro impiego e giustifica l'interesse che ne ha indotto la riesumazione dopo un periodo di oblio che le destinava ad essere una pura curiosità scientifica. Si è addirittura pensato che potessero avvicendare i "vetusti" motori a scoppio con dispositivi ecologicamente più adeguati caratterizzati da elevati rendimenti. Purtroppo all'euforia è subentrata la frustrazione poiché il menzionato rendimento corrisponde a condizioni di reversibilità lontane da quelle reali. Inoltre le pile a combustibile pur essendo dei dispositivi apparentemente semplici in realtà non sono molto affidabili, perché sono molto sensibili alla purezza dei reagenti e poco agevoli nella gestione.

05.04 - L'immagazzinamento dell'energia elettrica

Un importante problema che coinvolge profondamente l'elettrochimica riguarda l'immagazzinamento dell'energia elettrica. I dispositivi impiegati per tale scopo sono le batterie elettriche nelle quali alcuni componenti

chimici subiscono opportune trasformazioni attraverso le quali viene rilasciata o, in un processo di ricarica, assorbita energia elettrica. Nella sostanza si tratta di pile ricaricabili con una vita media relativamente elevata, costruite specificamente per accumulare energia.

L'immagazzinamento dell'energia elettrica (*Electrical Energy Storage*) offre un contributo significativo al miglioramento della sua trasmissione e distribuzione, mettendola infatti a disposizione quando è necessaria. Pertanto costituisce un importante accorgimento per poter utilizzare sorgenti intermittenti, in particolare quella solare[3]. Esiste un'ampia tipologia di batterie con diverse caratteristiche, ma quelle più impiegate sono state inventate da Gaston Planté nel 1859. Sono basate sulla trasformazione del piombo metallico in solfato. La loro tecnologia ha subito pochi cambiamenti dal momento in cui sono state inventate ed i loro principali inconvenienti restano l'elevato peso e il valore relativamente basso dell'energia che viene accumulata.

Pile dette a secco, anche se contengono una pasta gelatinosa umida, sono state introdotte da Georges Leclanché nel 1866. In esse gli elettrodi operano attraverso trasformazioni dello zinco che agisce da anodo e dell'ossido di manganese che agisce da catodo. Hanno acquistato importanza in molte applicazioni ad oggetti di piccola dimensione e di uso comune.

Attualmente sono commercialmente disponibili batterie a sodio/zolfo, applicabili alle reti di trasmissione ed in grado di operare a temperature elevate. Le celle sono costituite da una parte centrale che agisce come elettrodo negativo di sodio fuso separata da un tubo di β-allumina da zolfo fuso che agisce come elettrodo positivo. Tra i due elettrodi migrano ioni sodio.

Le batterie più moderne sono quelle ricaricabili al litio (Li-ion) nelle quali

l'elettrolita è costituito da un sale di litio in un solvente organico. Sono più leggere poiché gli ioni litio hanno una elevata densità di carica e possono essere costruite in diverse forme. Presentano però dei pericoli poiché se si surriscaldano o vengono caricate in modo eccessivo possono esplodere. L'elettrodo negativo è costituito da grafite, quello positivo da composti, solitamente ossidi, nei quali sono intercalati ioni litio.

Un importante parametro delle batterie è il valore dell'energia che riescono ad immagazzinare, espressa come energia specifica. Per le batterie al litio raggiunge valori che sfiorano 0,3 kWh/kg, che purtroppo resta basso se viene confrontato con quello degli idrocarburi che supera gli 11 kWh/kg. In realtà le batterie elettriche, pur offrendo l'approccio più comune per immagazzinare l'energia elettrica, sono troppo costose e non si sono ancora rivelate adeguate per essere applicate sui mezzi di trasporto. Le loro limitazioni potranno, forse, essere superate solo attraverso significativi avanzamenti basati su particolari accorgimenti o sull'impiego di nuovi materiali.

In conclusione non si può fare a meno di osservare che i modesti progressi sino ad ora realizzati nell'immagazzinamento dell'energia elettrica costituiscono una strozzatura allo sviluppo delle fonti di energia solare ed eolica che, come vedremo, producono energia elettrica in modo periodico o fluttuante.

05.05 - L'energetica dei processi biologici

Malgrado il loro elevato interesse intrinseco le trasformazioni dirette dell'energia chimica in energia elettrica hanno acquistato un ruolo marginale nelle tecnologie sino ad ora realizzate. Occupano però un ruolo di primo piano nei processi biologici poiché stanno alla base

delle trasformazioni che avvengono negli organismi viventi grazie alla partecipazione di alcune particolari molecole che agiscono quali vettori energetici[4]. Fra di esse un'importanza centrale va attribuita all'ATP (adenosintrifosfato) che reagisce con l'acqua attraverso un processo di idrolisi in cui si forma una molecola di acido fosforico ed una di ADP (adenosindifosfato), con liberazione di una quantità di energia libera pari a 7,3 Kcal/mole di ATP:

$$ATP + H_2O \rightarrow ADP + H_3PO_4$$

La trasformazione inversa, ovvero il ricupero dell'ATP da ADP, si verifica ad esempio e come abbiamo visto, nella fase luminosa della fotosintesi fruendo dell'energia catturata dalle radiazioni solari attraverso trasferimenti elettronici[5].

I processi che interessano la bioenergetica vengono chiamati metabolici e riguardano sia la produzione di energia per degradazione ossidativa di molecole complesse quali i grassi, le proteine e i carboidrati, sia la loro sintesi a partire da molecole semplici, quali l'anidride carbonica e l'acqua, presenti nell'ambiente. L'energia liberata dall'ATP contribuisce allo svolgimento di reazioni chimiche sintetiche di carattere biochimico, ma può svolgere anche un lavoro elettrico e meccanico come quello esercitato dai muscoli.

Gli elementi strutturali delle cellule che fanno da supporto a tali attività biofisiche e biochimiche sono le membrane lipidiche nelle quali sono innestati dei catalizzatori enzimatici che contribuiscono ad aumentare la velocità delle reazioni coinvolte nei diversi processi. In questo quadro rivestono particolare importanza i mitocondri, che sono dei piccoli organi che svolgono nelle celle le funzioni delle sorgenti di energia e che costituiscono dei veri e propri reattori chimici. In essi ha luogo l'ossidazione

dell'acido piruvico e degli acidi grassi liberando l'energia che contribuisce a trasformare l'ADP in ATP. Tutto ciò fruendo dei centri attivi enzimatici che si trovano sulla superficie di una membrana avvolta su se stessa e che quindi possono essere raggiunti attraverso la diffusione dei reagenti nelle zone comprese fra le pieghe della membrana stessa.

Nel quadro precedente rivestono interesse le biomacchine o nanomacchine molecolari costituite da un numero discreto di componenti molecolari che eseguono movimenti simil-meccanici in risposta a stimoli specifici. I dettagli dei meccanismi coinvolti sono oggetto di indagini. Quelle naturali intervengono in movimenti riguardanti le cellule e i microrganismi. Il necessario lavoro utile viene alimentato dalla variazione di energia libera associata alla reazione di idrolisi dell'ATP ad ADP.

Tali macchine molecolari possono comportarsi come i diavoletti di Maxwell che riescono a favorire processi che si svolgono in senso inverso a quanto previsto dal secondo principio della termodinamica. Supponiamo che i due recipienti separati dalla saracinesca manovrata dal diavoletto si trovino immersi in un bagno termico che tende ad uniformare la temperatura opponendosi alle manovre del diavoletto stesso. Per impedire che ciò si verifichi esso deve intensificare la sua azione selettiva sulle molecole accumulando informazioni la cui cancellazione può essere perseguita a spese di un flusso di energia libera che permette di mantenere il sistema lontano dall'equilibrio.

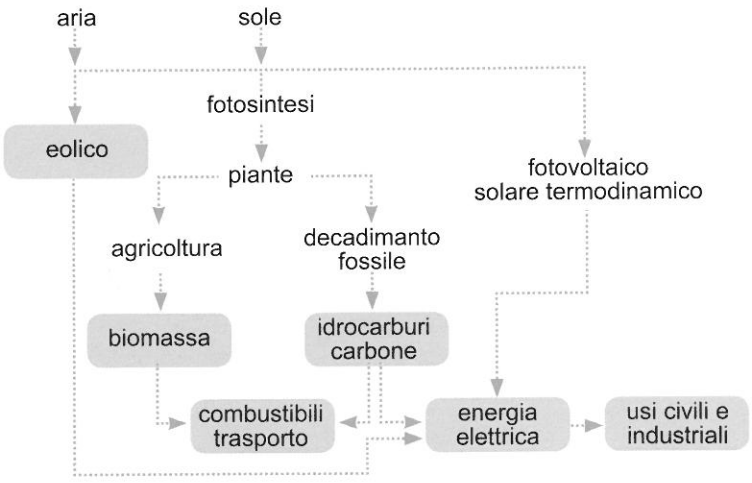
DISPONIBILITÀ E IMPIEGHI DELL'ENERGIA

06.01 - Ritorno a Carnot

"Dal calore dipendono tutti i grandi movimenti su cui si appuntano i nostri sguardi: le turbolenze atmosferiche, l'ascensione delle nuvole, la caduta delle piogge, le correnti d'acqua che solcano la superficie del globo di cui l'uomo è riuscito a impiegare per suo uso solo una parte esigua, le vibrazioni della terra e le eruzioni vulcaniche.

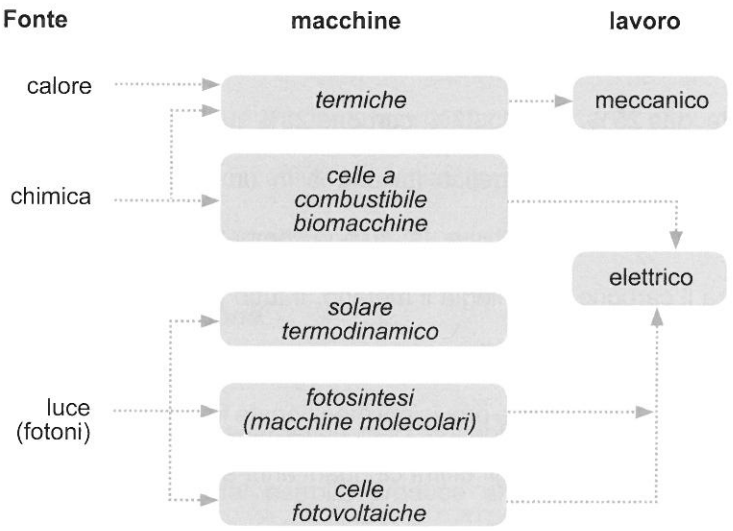
Da questo immenso serbatoio noi possiamo attingere la forza motrice necessaria ai nostri bisogni: la natura offrendoci da ogni parte il combustibile, ci ha dato la facoltà di generare sempre ed ovunque il calore da cui deriva la potenza motrice."

Con queste parole Sadi Carnot apre il suo saggio sulla potenza motrice del fuoco. Ad esse si deve aggiungere che tutti gli effetti menzionati sono dovuti ai fotoni solari, che costituiscono i vettori dell'energia che proviene dal sole derivante dai processi nucleari in esso presenti che si articola in forma gerarchica con le diverse forme di energia fruibili a livello terrestre, come illustrato nello schema seguente.



Sulla base di tale quadro non si può che concordare con Shakespeare quando scriveva: "*The stars above us govern our conditions*".

Come abbiamo visto le fonti termica, chimica ed elettromagnetica trovano rispondenza in diversi tipi di macchine macro e microscopiche in grado di fornire lavoro meccanico ed elettrico come viene illustrato nello schema che segue.



06.02 - **Consumi ed usi dell'energia**

Dopo la seconda guerra mondiale il consumo di energia ammontava a circa 3 TW di potenza (TW =10^{12} watt) e si prevedeva che entro la fine del secolo le sorgenti fossili sarebbero state sostituite dalla fissione nucleare che a sua volta con l'inizio di questo secolo sarebbe stata avvicendata dalla fusione nucleare.

Attualmente nel mondo viene consumata una quantità di energia pari a circa 16 TW di potenza con aumento di circa 0,2 TW/anno. Il 90% circa viene utilizzata in parti quasi uguali per usi civili, nell'industria e nel

trasporto. Inoltre più del 30% circa viene impiegata sotto forma di energia elettrica che viene prodotta dalle fonti fossili, principalmente il carbone, idroelettrica e nucleare ed minore misura da quelle rinnovabili quali l'eolica e la solare[1].

Se si esamina l'evoluzione nel tempo della produzione di energia a partire dalla seconda metà del secolo scorso, distribuito nelle diverse fonti[2] si osserva che la parte del leone viene esercitata dai combustibili fossili che conservano una percentuale superiore all'ottanta percento[3]. Si prevede che nel 2030 nel mondo la ripartizione fra le diverse fonti di energia sarà la seguente: gas 25%, petrolio 27%, carbone 28%, nucleare 5% e rinnovabili 15%. La situazione energetica italiana è in un certo senso atipica a conseguenza di scelte politiche. Infatti non comprende l'energia nucleare, penalizza il carbone e privilegia il metano. Il tutto per fornire una potenza globale di circa 0,25 TW.

Ne emerge quindi quanto le previsioni menzionate fossero sbagliate poiché lo sviluppo economico degli ultimi cinquant'anni è stato alimentato da un consumo di energia basato sostanzialmente sull'impiego del carbone, del petrolio, e del gas naturale. La prevalenza del petrolio è dovuta a diversi fattori che, oltre al basso costo includono la disponibilità di ampie infrastrutture per il trasporto del greggio (circa 1000 barili al secondo), per la sua raffinazione e per la distribuzione dei combustibili finiti. Infine fornisce ottimi vettori energetici quali la benzina e il gasolio, con un'elevata densità energetica, facilmente trasportabili, che rilasciano efficacemente l'energia nelle moderne macchine termiche.

In sostanza come affermava l'*Annual Energy Review* nel 2001 "*Le moderne economie industriali sono basate sul carbonio e la loro attività principale è la combustione*". Oggi il greggio è diventato così indispensabile alla

società occidentale ed ai paesi in via di sviluppo che la prospettiva di un'interruzione anche temporanea del suo rifornimento avrebbe significative ricadute non solo sull'economia, ma anche sulla sopravvivenza di attività di vitale importanza. Ricordiamo che circa il 10% del petrolio estratto viene impiegato quale materia prima per la produzione di prodotti chimici, in particolare i polimeri.

Pertanto la domande che insistentemente stanno affiorando riguardano la disponibilità dei combustibili fossili e le azioni da intraprendere per superare le difficoltà che sorgerebbero se la loro fornitura dovesse scarseggiare. In particolare ci si chiede a quanto ammontano le riserve di combustibili fossili e se esistono prospettive per emanciparsi dalla loro egemonia ed intraprendere un cammino verso un'economia post-petrolifera.

a) ***Sua maestà il carbone***

Il carbone è stato il protagonista della rivoluzione industriale e ha dominato il panorama energetico dell'Ottocento. Anche se nel trasporto è stato avvicendato dal petrolio produce ancora il 40% dell'energia elettrica mondiale. Viene estratto da miniere sotterranee o a cielo aperto e costituisce un carburante pronto all'uso. La sua origine é dovuta alla decomposizione di sostanze organiche vegetali, compresse, indurite e trasformate chimicamente con eliminazione di idrogeno e ossigeno, in un processo che si è protratto per più di 300 milioni di anni. Si stima che le riserve mondiali economicamente accessibili con le tecniche minerarie conosciute possano essere sufficienti alle attività umane, con l'attuale ritmo di consumi, per almeno 300 anni.

Il carbone può essere convertito in combustibili liquidi idrocarburici in modo diretto per idrogenazione o passando attraverso il gas di sintesi costituito

da una miscela di ossido di carbonio e idrogeno ottenuto trattandolo con vapor d'acqua ad elevata temperatura. Se il gas di sintesi viene fatto fluire su un catalizzatore a base di cobalto, nichel e ferro si ottiene una miscela di idrocarburi liquidi saturi e insaturi con un'ampia distribuzione dei pesi molecolari. Questa interessante reazione, detta di Fischer-Tropsch, permette di ottenere combustibili liquidi aprendo interessanti prospettive nel caso in cui si verificasse una carestia di petrolio. Esattamente come venne fatto in Germania durante la seconda guerra mondiale.

b) L'egemonia degli idrocarburi

Mentre nella seconda metà del secolo scorso lo sceicco Yamani, ministro del petrolio dell'Arabia Saudita affermava: "L'età della pietra non è finita perché sono mancate le pietre, allo stesso modo l'età del petrolio finirà prima che esso sia esaurito", il geologo americano King Hubbert ne cantava le esequie. La sua analisi si riferiva alle risorse costituite dalla quantità complessiva presente nel sottosuolo senza alcuna valutazione economica o comunque stima sulla sua estraibilità, ipotizzando che la curva dell'estrazione abbia l'andamento a campana all'incirca simmetrica, tipica delle distribuzioni statistiche. Il massimo, o picco, cade in corrispondenza ad una quantità di grezzo rimanente nel sottosuolo pari al 50% di quella che esisteva nel momento in cui sono iniziate le estrazioni. Chiamata URR (*Ultimate Recoverable Resources*) indica il petrolio grezzo ancora estraibile prima di rimanere a secco.

Questo approccio ha permesso di formulare la previsione corretta del valore dell'URR dei pozzi statunitensi. La distribuzione dei giacimenti di idrocarburi nel mondo rivela che sono nettamente privilegiati i paesi del Medio Oriente cui spetta più del 60% della produzione, con il resto

distribuito in modo quasi uniforme negli altri paesi e continenti. L'estensione dell'approccio di Hubbert ad una valutazione aggregata delle risorse mondiali di petrolio ha previsto che l'avvento del picco sarebbe caduto prima della fine del secolo scorso. Gli aumenti di costo cui era soggetto il petrolio, in particolare l'impennata subita negli Anni Settanta, é stata attribuita all'esaurimento delle risorse, dimenticando però che la dinamica dei prezzi é spesso condizionata dalla discrepanza fra l'aumento della domanda e le limitate capacità produttive conseguenti dalla mancanza di investimenti nelle attività estrattive. Le previsioni più recenti fanno cadere il picco intorno al 2020. Il dibattito é comunque aperto e si riconduce nel messaggio malthusiano sull'esaurimento delle risorse naturali.

Le incertezze presenti nelle valutazioni sono dovute al fatto che le perforazioni estrattive si sono estese *off-shore*, e hanno avuto negli ultimi anni un importante miglioramento grazie al massiccio intervento delle metodologie informatiche. Attualmente lo sfruttamento dei pozzi dipende dall'uso di tecniche di introspezione sismica tridimensionale, procedendo quindi con crescenti successi attraverso l'integrazione di dati geofisici e geologici grazie all'impiego di modelli fisico-matematici sempre più complessi e sofisticati[4]. Pertanto molti sforzi verranno dedicati alle indagini geologiche e di ingegneria intese all'individuazione e allo sfruttamento di nuovi giacimenti. In conclusione anche se sulla produzione del petrolio pende la spada di Damocle del picco di Hubbert è verosimile che gli idrocarburi continueranno ad essere i protagonisti dello scenario energetico del presente secolo.

Il gas naturale è una miscela di idrocarburi gassosi con grande prevalenza del più semplice di essi, il metano, che è presente in quantità compresa fra il 70-90%. Gli altri componenti sono idrocarburi leggeri quali l'etano, il

propano e il butano le cui molecole contengono rispettivamente due, tre e quattro atomi di carbonio. La sua scoperta ufficiale risale agli anni 1776-1778, e si deve agli studi di Alessandro Volta sul gas prodotto dai processi di decomposizione che si svolgono nelle paludi. Si stima che nel mondo esista una quantità di gas naturale sufficiente per alimentare richieste compatibili con l'attuale ritmo di consumi per almeno 150 anni.

Un'ulteriore fonte di metano sono i cosiddetti gas idrati, o clatrati, costituiti da masse solide biancastre formate da metano o altri idrocarburi leggeri intrappolati in particolari strutture dell'acqua presenti nei sedimenti marini ai margini dei ripiani continentali delle regioni artiche, sopratutto siberiane. È stato stimato che siano presenti più di 1600 miliardi di tonnellate di carbonio equivalente intrappolato sotto forma di metano nel permafrost delle zona artiche. Essi rappresentano un'enorme riserva potenziale di energia che però non è ancora stata sfruttata per le difficoltà che si incontrano nell'estrarre il metano senza contaminare l'atmosfera.

Infine si deve osservare che le trivellazioni con tecniche moderne stanno liberando, in particolare negli Stati Uniti, gas naturale chiamato *shale gas* o gas non convenzionale. In quantità notevoli, tanto che si ritiene che potrebbe cambiare nei prossimi anni il mercato globale dell'energia diminuendo l'importanza del Medio Oriente.

06.03 - Le fonti *"carbon free"*

Il largo impiego dei combustibili fossili ha fatto sorgere negli ultimi anni inquietanti preoccupazioni sull'evoluzione del clima verso un riscaldamento globale del pianeta attribuito all'anidride carbonica che si accumula nell'atmosfera per effetto della combustione. E ciò a conseguenza dell'effetto serra, in virtù del quale le radiazioni infrarosse che vengono emesse dalla

superficie terrestre vengono parzialmente assorbite e riemesse da alcuni dei gas presenti nell'atmosfera, in particolare dall'acqua, dal metano, dall'anidride carbonica e da altri prodotti della combustione quali gli ossidi di azoto. La riemissione si svolge in tutte le direzioni per cui una parte ricade sulla superficie terrestre contribuendo così ad aumentarne la temperatura.

Anche se esiste disaccordo sull'entità esercitata dalle attività umane su tale effetto, sono in corso iniziative intese a limitare l'impiego dei combustibili fossili, avvicendandoli con fonti di energia rinnovabili, o comunque *carbon free*, ovvero tali da non riversare nell'atmosfera anidride carbonica[5] .

Secondo alcuni opinionisti il menzionato *shale gas* potrebbe costituire il combustibile di transizione nel passaggio verso un'economia a basso carbonio, avvicendando il carbone che fra i combustibili fossili è quello che ha maggiori emissioni di CO_2. Esistono però anche i timori che l'estrazione del gas sia associata alla emissione nell'atmosfera di metano che presenta un effetto serra superiore a quello della CO_2 stessa.

È allora interessante esaminare a livello mondiale i contributi attuali delle diverse fonti rinnovabili, espresse in TW, anche se le valutazioni non possono che essere approssimate poiché alcune sono soggette a continue variazioni. Sono riportati con la loro incidenza sulla produzione di energia e il loro costo, nella seguente tabella:

	Attuali (TW)	
idroelettrica	0,3	(2,0%; 0,015$/kWh)
geotermica	0,1	(0,7%; 0,05$/kWh)
eolica	0,16	(1,1%; 0,07$/kWh)
solare	0,09	(0,6%; 0,35$/kWh)
biomassa	1,3	(8,7%)
totale	1,95	(13%)

Poiché la preziosa fonte idroelettrica sembra essere prossima al limite del suo impiego mentre il contributo delle biomasse verrà esaminato nel prossimo capitolo, ci soffermeremo nel prosieguo rispettivamente sulle fonti eolica e solare.

Prima di intraprenderne l'esame specifico si deve tenere presente che comunque la differenza fra i combustibili fossili e le fonti rinnovabili risulta significativa se si valuta la "densità di potenza", ovvero il flusso di energia prodotta per metro quadrato della superficie terrestre; quella dei combustibili fossili risulta superiore di quattro ordini di grandezza[6]. È interessante ricordare che questo parametro, come vedremo al capitolo 8, riflette il livello di complessità del processo sottostante e di conseguenza la sua compatibilità con l'evoluzione e la fruibilità delle corrispondenti tecnologie.

a) Il soffio del vento

In Europa i primi mulini a vento venivano usati per trasportare acqua o triturare cereali ed il paese nel quale hanno raggiunto la maggiore diffusione è l'Olanda, tanto da farli diventare il proprio simbolo nazionale. Le migliaia di mulini che popolavano ancora l'Europa settentrionale nel 19-simo secolo vennero però abbandonati con l'avvento delle macchine a vapore. L'interesse nei loro riguardi rinacque negli Anni Settanta del secolo scorso e da allora l'impiego dei successori dei vecchi mulini a vento per produrre energia elettrica ha preso piede con prospettive futuristiche quale il cosiddetto eolico d'alta quota inteso a sfruttare il vento nelle zone elevate dell'atmosfera. I più comuni sono i generatori eolici ad asse orizzontale nei quali il rotore viene orientato perpendicolarmente alla direzione del vento. Normalmente sono formati da una torre di acciaio alta 60-100 metri alla cui

sommità è collocato il generatore.

Il flusso energetico estraibile da una corrente eolica che investe un generatore è proporzionale al cubo della velocità del vento. Ne consegue che se si passa da una leggera brezza ad un vento che spira ad una velocità doppia aumenta di otto volte. Questo risultato evidenzia l'importanza della scelta della zona in cui deve essere ubicato un parco eolico. Il rendimento globale di un mulino si aggira sul 25-35%, per cui tenendo anche conto dell'intermittenza del vento si realizzano valori del flusso energetico compresi tra 11 e 57 W/m^2. In realtà l'installazione dei parchi eolici risulta conveniente solo in zone spaziose caratterizzate da una adeguata ventosità, fermo restando l'inconveniente delle fluttuazioni nella fornitura elettrica. Nel nord dell'Europa viene applicato anche l'eolico *off-shore* con impianti istallati ad alcuni chilometri dalla costa è interessante perché gli impianti sono relativamente semplici, con un costo dell'energia prodotta competitivo con quella delle fonti fossili. Il consenso su di essa non è però unanime sia per l'impatto esercitato sul panorama che per la rumorosità.

b) La cattura del sole

Il primo vistoso tentativo di carpire una piccola parte dell'energia che il sole invia con tanta prodigalità sul nostro pianeta viene attribuita ad Archimede, genio fisico-matematico dell'antichità. Si racconta che mediante l'impiego di specchi parabolici, detti ustori e descritti in un suo trattato perduto chiamato Catottrica, sia riuscito a concentrare i raggi riflessi del sole in un particolare punto chiamato fuoco, bruciando le navi romane. Il racconto appare avvincente, anche se studi successivi lo hanno riconosciuto poco probabile.

Nel processo solare termodinamico, chiamato anche CSP (*Concentrated*

Solar Power)[7] l'energia della radiazione viene direttamente convertita in calore impiegato per produrre energia elettrica. Un tipico impianto coinvolge un'adeguata superficie ricoperta da specchi accuratamente sagomati e dotati di sistemi di puntamento automatico per seguire l'evoluzione temporale della posizione del sole. Il fascio riflesso incide su un collettore solitamente collocato alla sommità di una torre che supera i cento metri di altezza. Esso raccoglie la radiazione che come energia termica viene accumulata in un fluido e quindi trasferita ad un impianto convenzionale per la produzione di elettricità. Il rendimento di questi impianti, espresso come rapporto fra l'energia elettrica prodotta e quella elettromagnetica incidente, dipende dall'efficienza della parte ottica (sistema specchi/collettore) e da quello del ciclo termodinamico che viene impiegato per la conversione del calore in energia elettrica. Tenendo conto delle temperature massime raggiungibili nel collettore (inferiori a 500°C) e del rendimento del sistema ottico si può arrivare a valori globali superiori al 30%. Pertanto nell'insieme si tratta di dispositivi potenzialmente efficienti, anche se permangono incertezze sulla loro durata e affidabilità. Infatti, il collettore deve essere attraversato da un fluido in grado di raggiungere temperature elevate per poter aumentare la resa del ciclo termodinamico e con elevata capacità termica in modo di poter immagazzinare il calore ad esso ceduto per un tempo relativamente lungo. Solitamente si impiega acqua purificata per cui la produzione di energia elettrica che sta a valle della caldaia solare risulta analoga a quella di una centrale termoelettrica alimentata a combustibili fossili. Le uniche differenze sono l'alternanza nella fornitura dell'energia ed il costo che è circa tre volte superiore, con poche possibilità di miglioramento.

c) La danza degli elettroni

Le prime celle fotovoltaiche furono realizzate all'inizio degli Anni Cinquanta del secolo scorso presso i laboratori della Bell Telephon, sfruttando un fenomeno che era rimasto una pura curiosità scientifica. Le prime applicazioni riguardarono il settore spaziale, nel quale il costo dell'energia aveva un'incidenza modesta. Con la crisi energetica del 1973 iniziarono le prime applicazioni terrestri, promuovendo programmi di ricerca intesi a diminuire il costo di produzione dell'energia in modo da renderla competitiva con quella dei combustibili fossili[8]. Il materiale attualmente più impiegato nella costruzione delle celle è il silicio la cui fabbricazione si avvale della tecnologia maturata nell'industria elettronica. Si tende ad usarlo sotto la forma di policristallo anche se si sta diffondendo l'utilizzo di celle a silicio amorfo in film sottili. I moduli così ottenuti raggiungono efficienze elevate nelle prove di laboratorio, ma nelle applicazioni su larga scala manifestano un'efficienza dell'ordine del 10%.

Nel 1961 il premio Nobel per la fisica William Shockley, uno degli inventori del transistor, e Hans J. Queisser hanno calcolato il rendimento di una cella fotovoltaica da principi fisici basilari[9]. Lo scopo era di fornire uno strumento che avesse un ruolo analogo a quello del ciclo di Carnot per le macchine termiche. Il loro approccio contempla la presenza di una sola giunzione ***p-n*** soggetta alla radiazione solare. Si assume che ogni fotone incidente ecciti una sola coppia elettrone-cavità per cui l'energia in eccesso a quella richiesta per creare la coppia viene dissipata in energia termica.

L'efficienza della cella è espressa dal rapporto fra l'energia della radiazione incidente per unità di tempo sulla superficie della cella con frequenza corrispondente a quella del gap $\Delta\varepsilon$ di energia del semiconduttore e

l'energia incidente totale. Sulla base dei processi fisici in gioco e delle caratteristiche geometriche dell'apparato risulta che essa può al massimo raggiungere il valore 0,31. Questo risultato teorico è stato confermato dai dati sperimentali concernenti celle a singola giunzione realizzate con diversi materiali semiconduttori quali il silicio monocristallino, policristallino e amorfo, e l'arseniuro di gallio, i cui valori sono, rispettivamente 0,25, 0,10, 0,25. L'importanza dell'analisi è stata però quella di mettere in evidenza che per superare tale limite di efficienza si devono violare le condizioni che stanno alla base del modello. Su queste linee si stanno orientando ricerche che procedono lungo strade diverse, prima di tutto costruendo celle con più giunzioni e quindi in grado assorbire una quantità maggiore di energia e con *gap* calibrati sulle zone più intense dello spettro solare. I materiali candidati sono i semiconduttori composti da elementi dei gruppi III (gallio, indio) e V (arsenico, azoto, fosforo) del sistema periodico. Le celle vengono costruite impilandoli in modo tale da dare origine a strutture a strati ai cui contatti si formano le giunzioni ***n-p***. Dispositivi con contatti del tipo GaInP/GaInAs/Ge hanno raggiunto rendimenti che sfiorano il 40%, aprendo così uno spiraglio ricco di possibilità esplorative, anche se le celle sino ad ora costruite risultano troppo costose.

Alternativamente si punta sull'impiego di nanostrutture, in particolare *quantum-dots,* che si possono modulare in modo di creare transizioni elettroniche intermedie a quella del gap elettronico, rendendo così disponibili transizioni elettroniche in grado di catturare l'energia distribuita nelle diverse frequenze dello spettro solare. I calcoli teorici dimostrano che si possono raggiungere efficienze molte elevate. In questo contesto stanno emergendo alcune interessanti innovazioni basate sull'impiego di film ultrasottili che appaiono promettenti[10].

I *LED* (*Light Emitting Diode*, diodi emettitori di luce) sono dei dispositivi che operano in modo inverso alle celle fotovoltaiche, poiché producono luce al passaggio della corrente elettrica. La loro economicità ne ha favorito la diffusione nelle tecnologie dell'illuminazione. Questo successo ha tratto vantaggio anche dall'impiego di materiali organici polimerici meno costosi e altrettanto efficienti di quelli inorganici, tali da suggerirne l'impiego per la costruzione delle celle solari. Un requisito indispensabile è ovviamente la loro stabilità nelle condizioni fisiche e chimiche cui vengono impiegati. La loro fabbricazione può fruire della larga esperienza maturata nel settore della chimica organica sintetica, grazie alla quale si possono produrre molecole con proprietà elettroniche opportunamente progettate. Ma la sfida emergente è quella di individuare nuove tecnologie che si collochino fra le celle fotovoltaiche e le foglie, sulla cui complessità non esistono dubbi. In altri termini si tratta di trovare degli ibridi fra l'industria e la natura ed in questo quadro si collocano le ricerche intese a simulare la fotosintesi. In sostanza non mancano idee sulla creazione di nuovi tipi di celle, ma tuttavia la possibilità che alcune di esse possano rivoluzionare il business energetico rimane ancora un'incognita.

In conclusione l'energia proveniente dal sole è molto elevata, ma la creazione di adeguate infrastrutture per poterla sfruttare ad una scala confrontabile con i consumi primari di energia costituisce una impresa immensa[11], anche perché la sua periodicità richiede particolari accorgimenti per la difficoltà di immagazzinare l'energia elettrica.

06.04 - **Dalla corteccia o dal cuore dell'atomo**

Una fonte di energia di grande potenzialità che non rientra nelle precedenti trae le sue origini dalle trasformazioni che avvengono nei profondi recessi

dell'atomo, ovvero il nucleo, le cui manifestazioni sembravano del tutto assenti nelle esperienze umane finché non fu scoperto il fenomeno della radioattività naturale. I processi nucleari sono presenti nella quasi totalità delle trasformazioni cosmiche, incluso il sole che sta all'origine di gran parte della nostra energia. La scoperta dell'energia nucleare ha aperto molte speranze sul futuro energetico ma ha fatto nascere anche molte inquietudini connesse con i rischi della sua gestione.

Un atomo è costituito da un nucleo carico positivamente perché formato da particelle, chiamate nucleoni, aventi all'incirca la stessa massa e divisi in protoni, dotati della stessa carica positiva e neutroni privi di carica. Nella corteccia esterna gravita un numero di elettroni uguale a quello dei protoni la cui massa ammonta a circa (1/1800) di quella dei protoni stessi. Ciascuno di essi è dotato di una carica negativa pari a quella dei protoni con segno cambiato ed in numero tale da neutralizzare la carica del nucleo. Se assimiliamo la corteccia elettronica e il nucleo a due sfere, una esterna all'altra, risulta che la dimensione media della corteccia, nella quale sono contenuti gli elettroni è all'incirca 100.000 volte più elevata di quella del nucleo la cui dimensioni sono dell'ordine di 10^{-14}m. Anche le energie sono molto diverse, poiché quelle di legame fra le particelle nucleari sono 200.000 volte maggiori di quelle che tengono uniti gli elettroni presenti nella corteccia del nucleo. Questo fatto evidenzia chiaramente che i processi che si svolgono sulla scala nucleare sono associati a variazioni di energia molto più elevate di quelli che hanno luogo sulla scala elettronica[12].

La quantità di energia liberata nella reazione nucleare nella quale un neutrone provoca la scissione di un nucleo di uranio *U-235* è circa 10 milioni di volte superiore a quella liberata nella combustione di un idrocarburo. Il processo avviene attraverso una reazione detta a catena poiché la fissione

di un nucleo di uranio provocata da un neutrone libera mediamente 2,5 neutroni che permettono il proseguimento autonomo del processo stesso. Nei reattori è presente un sistema di rallentamento dei neutroni emessi che ha lo scopo di portarli ai valori della velocità caratteristica dell'equilibrio termico per renderli in grado di innescare la reazione a catena. Il processo viene realizzato immergendo i blocchetti di uranio in un materiale moderatore, per cui risulta possibile controllare la velocità della reazione di fissione mantenendola ai livelli compatibili con una buona gestione del processo.

Attualmente sono in funzione circa 430 reattori nucleari che forniscono circa il 6% dell'energia mondiale sotto forma di energia elettrica. La zona di un reattore in cui il materiale fissile genera energia termica, chiamata nocciolo, viene percorsa da un fluido che trasferisce il calore a un gruppo turbine-alternatore per la produzione di energia elettrica. La potenza degli impianti va da un minimo di 0,04 GW sino ad oltre un GW. I più moderni hanno una potenza compresa fra 0,6-1,6 GW. La gran parte delle centrali nucleari in uso è del tipo PWR (*Pressurized Water Reactor*) poiché sono tecnologicamente semplici. Nel nocciolo avvengono le reazioni nucleari che riscaldano gli elementi di combustibile impilati in cilindri lunghi e stretti. Sono lambiti dall'acqua di raffreddamento del circuito primario che asporta il calore e si riscalda sino a 300-330°C, senza evaporare perché tenuta ad una pressione superiore a 150 atm. Diminuendo la pressione l'acqua evapora ed il vapore liberato investe una turbina collegata con un generatore di energia elettrica. Completa il sistema un circuito secondario di raffreddamento dell'acqua che circola nella turbina.

"L'energia nucleare, il sogno fallito" così recita laconicamente la copertina dell'Economist[13] per presentare un lungo servizio sullo stato dell'arte, o

meglio di salute, dell'energia nucleare nel mondo. Eppure nel dopoguerra era nata sotto i migliori auspici, poiché avrebbe dovuto affrancare la società umana dalle richieste di energia tanto da venire mediaticamente presentata come l'immagine di una nuova era. Tuttavia dopo un esordio vivace la costruzione dei reattori nucleari ha cominciato a ristagnare. Con vicissitudini alterne contrassegnate dal pathos suscitato da alcuni incidenti, in particolare quello di Chernobyl e più recentemente di Fukushima.

Le metodologie impiegate per la progettazione dei reattori nucleari hanno un *pedigree* di tutto rispetto, poiché sono state tenute a battesimo da Enrico Fermi ed Eugene Wigner, che hanno posto le basi per gli studi intesi alla comprensione sia dei processi di fissione che della diffusione dei neutroni. John Wheeler, che insieme a Niels Bohr, aveva dato un contributo importante alla teoria della fissione nucleare, ha affermato che un reattore nucleare è semplice, almeno concettualmente, purché non lo si faccia funzionare. Questa laconica sentenza mette in evidenza le difficoltà e gli sforzi che si sono incontrati per poter cogliere il vantaggio dell'impiego di tale fonte di energia senza produrre agenti inquinanti allontanando dall'opinione pubblica i timori da incidenti.

Attualmente lo sviluppo dell'energia nucleare rischia di essere severamente ostacolato dalle conseguenze degli eventi giapponesi. L'opinione pubblica è contraria e il suo avvenire è quanto mai incerto. Ci si interroga quindi su quali innovazioni tecnologiche ci si deve orientare per restituire fiducia ad una sorgente di energia la cui nascita aveva suscitato tante speranze, ma la cui frustrazione porrebbe seri problemi sul futuro equilibrio delle fonti energetiche. Pertanto pur generando timori per la sicurezza è auspicabile che vengano sviluppate adeguate tecnologie basate su reattori di piccole dimensioni e quindi più sicuri, aperti a particolari applicazioni, quali la

desalificazione, il riscaldamento e il trasporto.

In conclusione l'abilità a frantumare i nuclei atomici estraendone energia è stata sicuramente uno dei più grandi successi della scienza del secolo scorso. Purtroppo ha fatto però nascere dubbi sul determinismo tecnologico, evidenziando che, indipendentemente dalle sue capacità, la tecnologia deve risultare compatibile con le condizioni sociali e politiche del momento.

06.05 - Energia dalla terra

Globalmente il flusso medio di energia rilasciato dalla terra, detta geotermica e dovuta sia al suo raffreddamento che alla radioattività, ammonta a 0.057 W/m^2, per cui se si tiene conto della superficie delle terre emerse offre una potenzialità energetica di circa 10 TW. Attualmente il suo sfruttamento è modesto ed avviene in gran parte con procedimenti idrotermali perché basati sull'impiego diretto di sorgenti naturali costituite da miscele di acqua e vapore ad alta temperatura (maggiore di 150-200°C). Si tratta quindi di una tecnologia semplice poiché è sufficiente praticare un foro in uno strato di rocce contenenti il fluido caldo che emerge in superficie e viene quindi inviato in una turbina, dopo essere stato purificato dai composti corrosivi e nocivi e dai detriti di roccia che vengono trascinati. Purtroppo, queste sorgenti sono sporadiche e pertanto la tecnica risulta sfruttabile solo in pochi casi. In realtà la prospettiva di sfruttamento del potenziale geotermico richiede impianti che operino con la circolazione a ciclo chiuso di un fluido ausiliario che fluisce attraverso ad una rete di tubi di piccolo diametro in grado di fornire una elevata superficie di scambio termico. La realizzazione di questi impianti, battezzati "*Enhanced Geothermal Systems*", è ancora in fase di studio poiché le tecnologie di perforazione profonda non sono

ancora mature per realizzarli. Un ulteriore contributo all'utilizzo dell'energia geotermica proviene dagli approcci chiamati a "bassa entalpia" dove si impiegano installazioni che consentono di ottenere un fluido intorno ai 70°C, in modo tale da poter essere impiegato nel riscaldamento domestico o per scopi affini.

06.06 - Egemonia dei combustibili fossili

Se le fonti fossili fossero prossime all'esaurimento la nostra società sarebbe avviata ad una gravissima crisi, ma fra le cose da fare il risparmio dell'energia da esse ottenuta risulterebbe poco utile perché si imporrebbe la necessità di attivare fonti diverse da quelle in estinzione. Se viceversa le forniture di petrolio continuassero con un ritmo soddisfacente il risparmio non sarebbe necessario per la ragione opposta alla precedente, ma l'efficienza andrebbe comunque perseguita. Ad esempio è stato valutato che la riduzione dei consumi di carburante in nuovi veicoli può essere realizzata solo con aumenti significativi del costo delle automobili stesse[14]. Anche se questo approccio non costituisce almeno sino ad ora un fattore di competizione nel mercato automobilistico non si deve dimenticare che esso contribuirebbe significativamente a diminuire la CO_2 prodotta con conseguenti vantaggi ambientali.

L'ipotesi precedente sull'abbondanza degli idrocarburi sul pianeta potrebbe essere considerata eretica, ma non dimentichiamo che conosciamo ancora poco del sottosuolo. I recenti ritrovamenti di gas naturale, sotto la forma di *shale gas* e di petrolio sotto la forma di *shale oil*, stanno letteralmente cambiando il panorama energetico e della chimica industriale, e sono sintomatici sull'abbondante presenza in diverse forme degli idrocarburi nel pianeta. In particolare lo *shale oil* include rocce sedimentarie che

contengono materiali bituminosi che per riscaldamento vengono rilasciati sotto forma di liquidi petroliferi. Ricordiamo a tale proposito che l'accumulo di ossigeno nell'atmosfera sino all'attuale 20% è dovuto al seppellimento di materiale organico che limita il consumo dell'ossigeno stesso nella reazione di ossidazione, detta di respirazione, rispetto a quella con la quale viene prodotto per fotosintesi. Nell'ecosistema infatti le due reazione di fotosintesi e ossidazione avvengono in senso inverso e sono accoppiate fra di loro. Tuttavia poiché parte delle biomasse vengono sepolte nel sottosuolo non tutto l'ossigeno prodotto prende parte alla reazione di ossidazione per cui si accumula nell'atmosfera. Se si tiene conto che il processo si è protratto per centinaia di milioni di anni si valuta che abbia avuto luogo un accumulo di materiale organico nel sottosuolo con un contenuto di carbonio 26000 volte superiore a quello presente nella biosfera[15],[16],[17]. Esso prende la forma di carbone, gas naturale, petrolio, solo in parte presenti nei giacimenti ed il resto dispersi nel terreno, negli oceani e nelle rocce.

In una programmazione pragmatica è comunque opportuno tenere presente che sul petrolio pende la spada di Damocle dell'esaurimento, tipica delle risorse non rinnovabili. Pertanto il risparmio va praticato purché associato con le ricerche sull'attivazione di risorse che si possano considerare veramente alternative alle fossili. Resta comunque confermata la necessità di affrontare i problemi energetici ponendo l'accento sugli aspetti tecnologici che stanno alla base di qualunque progettazione e gestione dei processi industriali migliorandone l'efficienza. E ciò attraverso un costante miglioramento degli impianti e dei dispositivi che vengono utilizzati fruendo di interventi innovativi che possano creare salti di qualità nell'utilizzo dell'energia.

ENERGIA DELLA BIOSFERA

07.01 - Un pianeta color smeraldo

Dopo aver conferito al pianeta quel tipico color smeraldo che caratterizza le foreste ed avere contribuito all'alimentazione dell'umanità, grazie all'agricoltura, il mondo vegetale potrebbe giocare ancora una volta un ruolo importante sul suo avvenire sottraendola dagli incubi della carenza di energia. L'emancipazione del genere umano dallo stato primitivo è infatti avvenuta solo in seguito alla moltiplicazione dei vegetali in grado di produrre alimenti. La diverse rivoluzioni agricole che si sono succedute in Cina e a partire dal XVII secolo in Europa diffondendosi dalle Fiandre e dall'Italia settentrionale, hanno riguardato l'intensificazione delle produzioni attraverso la sistemazione idraulica di terreni opportunamente scelti e l'impiego dei fertilizzanti naturali. Successivamente l'agricoltura è entrata in simbiosi con la chimica utilizzando in successione i concimi chimici sintetici e i fitofarmaci in grado di combattere le malattie delle piante.

I principali componenti del mondo vegetale sono gli idrati di carbonio,o carboidrati, che comprendono i più importanti costituenti delle piante quali l'amido, la cellulosa e l'emicellulosa, formati da polimeri aventi formula generale $[CH_2O]_n$ con n dell'ordine di 10^4. In sostanza si possono formalmente considerare costituiti da n unità, o mattoni, formati da un atomo di carbonio e da una molecola d'acqua, da cui il loro nome. Con $n=12$ si hanno i disaccaridi o zuccheri, come il saccarosio, che vengono estratti dalla canna da zucchero e dalla barbabietola, le cui caratteristiche organolettiche e gli impieghi nel settore alimentare sono ben conosciuti[1].

Come è noto dall'antichità il saccarosio è soggetto ad un processo di fermentazione grazie all'azione di catalizzatori biologici chiamati enzimi

presenti in un particolare batterio, il *sacharomices cerevisiae*. Si forma anidride carbonica unitamente all'alcol etilico C_2H_5OH le cui caratteristiche sono molto popolari poiché è il principale componente delle bevande alcoliche. Da qualche anno sta anche risvegliando interesse quale additivo delle benzine, avviandosi quindi verso un impiego un po' meno inebriante.

Le masse di polisaccaridi ottenute dalla destrutturazione del legno, per azione di un particolare enzima, chiamato amilasi, reagiscono con l'acqua producendo il saccarosio. I polisaccaridi sono presenti in quantità che vanno dal 50% al 90% ed unitamente alla lignina conferiscono la forza strutturale ai tronchi. Sono però stabili dal punto di vista chimico, e quindi non facilmente digeriti dai microbi che catalizzano la fermentazione alcolica per cui la preparazione dell'etanolo non risulta del tutto agevole e richiede il menzionato passaggio intermedio di idrolisi in presenza di un opportuno enzima. Per fortuna altrimenti le smeraldine foreste si scioglierebbero sotto la pioggia.

Le piante vengono distinte in due specie chiamate rispettivamente C3 e C4[2]. Nelle prime la sintesi dei carboidrati avviene attraverso un meccanismo scoperto da Melvin Calvin, cui fu conferito il premio Nobel, e Andrew Benson, nel quale la CO_2 per azione di un particolare enzima chiamato rubisco, (acronimo di **Ru**bilosio **Bis**fosfato **C**arbossilasi/**O**ssigenasi) reagisce con una molecola contenente 5 atomi di carbonio per formare due molecole con tre atomi di carbonio. Combinandosi fra di loro formano catene di anelli con sei atomi cascuno, grazie all'apporto fornito dalle molecole di ATP e di NADH che trasferiscono l'energia dei fotoni catturata nei fotosistemi I e II nei legami chimici presenti nelle molecole dei carboidrati aventi un elevato

contenuto di energia libera attraverso un processo globale del tipo:

$$n\,CO_2 + n\,H_2O \rightarrow [CH_2O]_n + n\,O_2$$

La cattura dei fotoni a bassa entropia e il trasferimento della loro energia in molecole complesse con elevato contenuto di energia libera sta alla base dell'organizzazione dei processi vitali. In sostanza non è l'energia che sostiene la vita, ma il suo flusso.

Tutto ciò attraverso un ciclo di reazioni detto di Calvin-Benson che pur essendo diventato famoso, è stato successivamente messo in discussione dai due scienziati australiani Hal Hatch e Briton Roger Slack che hanno evidenziato l'esistenza di un altro meccanismo, detto C4 perché coinvolge molecole con quattro atomi di carbonio, più complesso ma più efficace[3]. Grazie all'intervento di speciali trasportatori molecolari che in virtù di una particolare struttura della cellula agiscono come pompe, si crea un'elevata concentrazione di CO_2 attorno al rubisco. In sostanza è come se si creasse una "serra" locale che aumenta la velocità di cattura della CO_2 e quindi di crescita delle piante. Le ricerche successive avrebbero rivelato che il meccanismo C4 ha un ruolo dominante nella crescita delle piante in diverse parti del mondo, in particolare nelle zone tropicali, ed interviene nella crescita del mais e della canna da zucchero, entrambi di interesse nella produzione di biocarburanti. L'emergenza delle piante nelle quali interviene il meccanismo C4 deriva da un processo evolutivo che ha seguito l'arricchimento di ossigeno dell'atmosfera. Con il meccanismo C3 si producono circa 1,9 g di zucchero per MJ di energia assorbita, mentre il meccanismo C4 è più efficace poiché produce sino 2,4 g di zucchero per MJ di energia assorbita. Entrambi ovviamente in condizioni ideali di luce assorbita.

Un elemento essenziale nelle cellule è l'azoto. Sebbene sia abbondante

nell'atmosfera, la presenza di un triplo legame nella sua molecola biatomica la rende inaccessibile agli organismi vegetali salvo quelli appartenenti alla famiglia delle leguminose. Pertanto gli altri vegetali lo possono catturare solo attraverso gli ioni ammonio e nitrati presenti nel terreno, la cui quantità dipende dall'impiego dei fertilizzanti.

07.02 - **Impiego delle biomasse quali combustibili**

Le biomasse comprendono tutti quei materiali di origine vegetale che non hanno subito un processo di fossilizzazione e che possono essere utilizzati per la produzione di energia. Rientrano nelle fonti rinnovabili perché l'anidride carbonica emessa dalla loro combustione è la stessa che le piante hanno assorbito per svilupparsi.

Il modo più semplice per ricavare l'energia dalle piante è quello di crescerle per poi impiegarle quali combustibili. Anche se la crescita avviene sotto l'azione dei raggi del sole non c'è niente di nuovo sotto di esso poiché si tratta del primo approccio esercitato dall'uomo per la produzione dell'energia. Sfortunatamente il processo risulta disastrosamente inefficiente perché ha un rendimento globale dello 0,3%. Per produrre 16 TW si dovrebbero impiegare 3.10^{13} m^2 di terreno, che corrispondono a circa il 20% del totale delle terre emerse. Per questa ragione si preferisce procedere utilizzando i prodotti che si ottengono dai vegetali attraverso processi chimici, primo fra tutti l'alcol etilico. Da qualche anno viene impiegato quale carburante per integrare le benzine, partendo da vegetali contenenti polisaccaridi quali il mais o meglio la canna da zucchero. Inoltre si producono combustibili liquidi in grado di surrogare quelli derivati dal petrolio. Tipico è il cosiddetto biodiesel ottenuto dagli oli vegetali ricavati dai semi oleosi di colza, soia o girasole, attraverso una reazione di transesterificazione nota da lungo

tempo[4].

I biocarburanti possono essere direttamente impiegati senza essenziali modifiche dei motori a combustione interna. Purtroppo però l'intensificazione dell'uso dei prodotti agricoli per produrli sta depauperando le risorse naturali. Secondo stime ragionevoli questa tendenza sarebbe responsabile dell'aumento del prezzo degli alimentari influendo in modo significativo sul loro mercato. In sostanza l'impatto ambientale dei biocarburanti è complesso e controverso per l'influenza che esercita sullo sfruttamento della terra e per il rischio di compromettere la filiera agricola. Sta quindi emergendo la sensazione che le strade sino ad ora adottate per l'impiego delle biomasse nel settore energetico costituiscano solo una fase interlocutoria verso approcci più innovativi ancora in fase di ricerca.

Schematicamente vengono identificate due fasi nel settore dei biocarburanti, la prima delle quali riguarda l'impiego di raccolti usati anche per alimentare animali e pertanto in conflitto con la produzione del cibo. Per questa ragione a partire nell'intorno del 2005 sta subentrando una seconda fase basata sull'impiego di coltivazioni ricche di cellulosa, specificamente dedicate alla produzione di energia. Ma all'orizzonte si sta affacciando una terza fase più rivoluzionaria basata sull'impiego dei cosiddetti batteri ingegnerizzati, che costituiscono un frutto dell'ingegneria genetica come verrà illustrato nel prossimo paragrafo.

07.03 - **Uno sguardo al futuro**

La trasformazione degli idrocarburi in prodotti, diventati ormai indispensabili per le nostre attività quotidiane, ha costituito una sfida impegnativa che ha coinvolto i chimici nella seconda metà del secolo scorso. Confermando così che lo sviluppo delle attività produttive non può prescindere dall'utilizzo di

risorse naturali che grazie alla cultura e all'ingegnosità umana vengono trasformate in oggetti e manufatti. Il petrolio deve però essere condiviso con la produzione di energia che esercita la parte del leone poiché ne consuma circa il 90% di quello estratto.

Sta però emergendo una frontiera scientifica tecnologica il cui successo potrebbe trasformare molti aspetti connessi con l'avvicendamento delle risorse e delle fonti energetiche[5],[6]. Viene chiamata biologia sintetica ed esplora la possibilità, e i pericoli, di modificare selettivamente porzioni del genoma delle cellule con lo scopo di orientarne il comportamento. Più specificamente i suoi obbiettivi sono:

- lo sviluppo di una cellula minima che contenga le funzioni vitali essenziali
- la generazione di sistemi artificiali aventi le proprietà delle cellule viventi
- progettazione di opportuni cammini metabolici

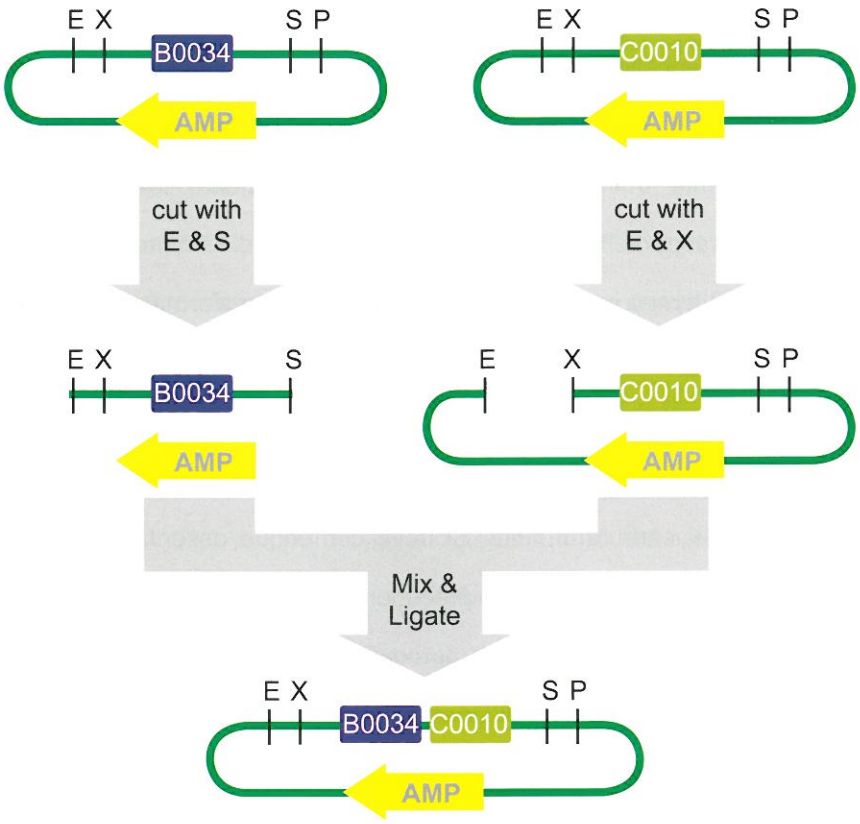
Ricordiamo che il metabolismo è l'insieme delle reazioni chimiche che avvengono nelle cellule con lo scopo di liberare energia attraverso la degradazione di molecole complesse producendone di più semplici come l'ATP (catabolismo), o produrre molecole complesse a partire da molecole più semplici utili alle cellule (anabolismo). Questi processi si svolgono attraverso schemi molto complessi di reazioni chimiche reciprocamente interconnesse fruendo della presenza di particolari enzimi che agiscono quali catalizzatori aumentando la velocità di ben definite reazioni. La loro azione viene controllata da un Circuito di Regolazione Genica (*Gene Network Regulatory, GNR)* che condiziona l'attività naturale delle cellule agendo in modo simile ad un circuito elettronico. Le loro modifiche agiscono come interruttori *on=off* che interrompendo, o attivando l'azione

di particolari catalizzatori, possono orientare gli schemi metabolici delle cellule verso particolari prodotti.

Con un approccio ambizioso, e provocatorio, la ***biologia sintetica*** si propone di costruire una cellula, semplice per quanto riguarda le sue funzioni, ma con un genoma opportunamente progettato per esercitare azioni catalitiche volte alla sintesi di ben definiti prodotti. All'avanguardia in queste attività è il *Craig Venter Institute*, che porta il nome di uno dei pionieri della decifrazione del genoma umano. Al suo attivo si deve registrare il successo di avere sostituito il genoma di un batterio con un altro opportunamente progettato[7].

L'***ingegneria metabolica*** esplora le complicate reti dei cammini metabolici degli organismi monocellulari procariotici con l'intento di isolarne i passaggi rilevanti connettendoli fra di loro in modo da favorire la produzione di prodotti chimici, farmaci e carburanti[8]. In natura infatti i cammini metabolici sono connessi in complicate reti che si sono evolute per la sopravvivenza e la riproduzione e non per la produzione di composti chimici di interesse diverso. Tuttavia se si riesce ad isolarne gli stadi rilevanti connettendoli fra di loro si possono ottenere carburanti quali l'idrogeno, il metano e gli alcoli. La sua applicazione ad un batterio, ad esempio l'*escherichia coli*, attraverso la ricostruzione del suo genoma, offre la possibilità di progettare cellule che si comportano come catalizzatori per processi chimici mirati. Tutto ciò iniettandogli mediante la tecnica del DNA-ricombinante un opportuno frammento di un plasmide, ovvero di uno di quei filamenti circolari di DNA presenti nelle cellule, che agisce da veicolo di un genoma opportunamente modificato attraverso l'assemblaggio di due parti in grado di conferirgli particolari comportamenti. Tale quindi da conferire alla cellula modificata particolari proprietà metaboliche. Tutto ciò fruendo di una tecnica di

assemblaggio, ormai standardizzata, che utilizzando particolari enzimi è in grado di tagliare i plasmidi e combinare fra di loro le parti separate, come illustrato nel seguente schema.



Si modifica così il Circuito di Regolazione Genica in modo tale da orientare gli schemi metabolici delle cellule verso i prodotti desiderati. Si tratta di un approccio nel quale convergono competenze molto diversificate che riguardano oltre alla biochimica, la genetica, la chimica fisica, l'ingegneria e la matematica, che devono operare in modo integrato.

È evidente che l'illustrata tecnica di assemblaggio offre possibilità illimitate per la sintesi di svariati prodotti attraverso strade innovative. Pertanto le sue prospettive di impiego delle tecniche precedenti per la preparazione di biocarburanti da biomasse, trasformando la cellulosa presente nelle piante

che, come è stato menzionato, è recalcitrante all'azione dei batteri sono molto promettenti. In altri casi si possono inserire opportuni cicli metabolici in quello naturale della fotosintesi aprendo la prospettiva di riciclare direttamente l'anidride carbonica. L'impiego dei biocarburanti ottenuti dalle biomasse ligneocellulosiche fruendo dell'ingegneria genetica costituisce una strada potenzialmente vincente anche perché la sua applicazione può largamente fruire delle infrastrutture attualmente impiegate nel settore del trasporto[9]. In sostanza si tratterebbe di diminuire in modo significativo il tempo impiegato dalle biomasse per trasformarsi in petrolio grazie all'impiego di batteri opportunamente programmati. Questa strada dovrebbe risultare meno traumatica di altri approcci poiché utilizzerebbe gran parte delle infrastrutture attualmente impiegate per la distribuzione e l'impiego dei carburanti fluidi. Si deve comunque osservare che non mancano obiezioni sull'approccio precedente, soprattutto di carattere etico che riguardano la possibilità di compromettere l'integrità della natura e la legittimità da parte dell'uomo di giocare alla divinità.

In conclusione se l'impiego delle biomasse nella forma tradizionale sino ad ora utilizzata deve essere scoraggiato perché tende a compromettere la filiera agricola, viceversa grazie ai menzionati sviluppi dell'ingegneria genetica si potrebbe ottenere un'apprezzabile quantità di combustibili da materiale lignocellulosico senza compromettere le richieste di cibo. Si tratta di un'impostazione innovativa intesa a sfruttare il flusso di energia libera che proviene copiosa dal sole e che in gran parte si disperde a contatto con il pianeta nel processo di termalizzazione che crea entropia. Grazie all'impiego di batteri ingegnerizzati essa può venire specificamente indirizzata alla sintesi di idrocarburi o alcoli superiori partendo dall'anidride carbonica presente nell'aria. In sostanza tenendo conto che la terra non

è un sistema termodinamico isolato ma scambia energia con l'ambiente esterno, viene ripercorso in un tempo molto più breve il processo nel quale in milioni di anni si sono formati i combustibili fossili dalle biomasse. Promettenti successi in questa direzione sono in corso, ad esempio fruendo in particolare di coltivazioni in acqua marina di alghe.

07.04 - **Bilancio entropico della terra**

L'energia non possiamo crearla ne riusciamo a distruggere quella che abbiamo a disposizione. Potremmo quindi accontentarci di quanto ci è stato concesso se non esistesse l'entropia che a differenza dell'energia aumenta inesorabilmente: come le tasse. E nello stesso modo in cui le tasse diminuiscono i nostri introiti, diminuisce l'energia accessibile per svolgere lavoro utile. Inoltre poiché un elevato contenuto di entropia caratterizza la bassa qualità dell'energia ne consegue che il mondo è soggetto ad un continuo degrado. Quando la temperatura raggiungerà l'uniformità in ogni punto dell'Universo, considerato come un sistema isolato, in accordo a Lord Kelvin sarà raggiunta la morte termica. Pur trattandosi di un evento remoto la sua prospettiva appare deprimente poiché fornisce l'immagine di un Universo uniforme e privo di colore.

Tuttavia esistono processi che sembrano eludere il secondo principio della termodinamica ed in virtù dei quali alcuni sistemi, riguardanti la fisica, la chimica, ma soprattutto la biologia, sono soggetti a fenomeni spontanei di differenziazione che portano alla formazione di strutture ordinate. Questi eventi sono associati ad una diminuzione locale di entropia che apparentemente sfida il secondo principio della termodinamica[10].

SCHEDA 8

La terra si trova in uno stato energetico stazionario poiché non trattiene l'energia che riceve dal sole , ma dopo alcune trasformazioni la trasferisce nuovamente nello spazio. Essa viene investita da un flusso di energia elettromagnetica Φ equivalente ad un flusso di fotoni ciascuno con energia hν e quindi pari a $\Phi/h\nu$ fotoni per unità di tempo. La luce incidente sulla terra è essenzialmente formata da fotoni corrispondenti alla luce visibile aventi frequenze relativamente elevate, mentre la radiazione ritrasmessa nello spazio contiene un'elevata frazione di radiazioni infrarosse con frequenze relativamente basse.
Se indichiamo con T_s la temperatura della radiazione incidente e con T_0 la temperatura della terra la variazione di entropia per unità di tempo associata al processo in esame (SCHEDA 4) risulta espressa da:

$$\frac{\Phi}{T_s} - \frac{\Phi}{T_0} = \frac{\Phi (T_0 - T_s)}{T_0 T_s} < 0$$

Infatti poiché $T_s > T_0$ il suo valore è negativo.

In sostanza il sole costituisce una grande sorgente di energia a basso contenuto entropico perché la sua "macchia calda" non si trova in condizioni di equilibrio termico con l'ambiente circostante formato dalle nubi e dal gas interstellare. Una parte di tale energia luminosa che raggiunge la terra contribuisce allo svolgimento di processi chiamati fototropici, primo fra tutti la fotosintesi. I fotoni promuovono gli elettroni presenti nelle molecole d'acqua ad elevati livelli energetici con liberazione di ossigeno. Successivamente cedono la loro energia alla reazione di trasformazione dell'ADP in ATP che, come abbiamo visto, è il più importante vettore energetico dei processi biochimici. In sostanza tutti i processi biologici dipendono dall'assorbimento dei fotoni solari come ha elegantemente enunciato il premio Nobel Albert

Szent-Györgyi: "*Quando un fotone interagisce con una particella presente sul nostro pianeta solleva un elettrone ad un livello di energia più elevato. Lo stato eccitato ha una vita molto breve e l'elettrone ritorna allo stato fondamentale entro 10^{-7}-10^{-8} secondi liberando la sua energia in eccesso. La vita ha imparato a catturare l'elettrone nello stato eccitato per utilizzarlo nei suoi meccanismi biologici*".

07.05 - **Uno sguardo all'ecologia**

Coniata dal biologo tedesco Ernst Haeckel nel 1866, ispirandosi al greco antico *oikos* (casa), la parola ecologia è rimasta per lungo tempo retaggio di pochi specialisti sino a diventare uno dei termini più inflazionati del linguaggio comune. Indica la disciplina che studia la biosfera ovvero la porzione della terra in cui è presente la vita e le cui caratteristiche sono determinate dalle interazioni fra diversi organismi, fra di loro e con l'ambiente circostante. Ma soprattutto si propone di comprendere la natura delle interazioni presenti nei complessi sistemi naturali con lo scopo di poterne trarre vantaggio nella gestione dell'ambiente[11]. Dal punto di vista termodinamico gli ecosistemi sono sistemi aperti, perché immersi in un ambiente con il quale scambiano energia e materia nell'ambito di diversi livelli di organizzazione strutturati gerarchicamente. Nell'intervallo dei cento gradi circa compatibili con l'esistenza della vita, almeno nella forma che ci è familiare, esiste una competizione fra processi che tendono a costruire complesse strutture biochimiche e altri che tendono a distruggerle attraverso la decomposizione della materia organica. I processi che hanno luogo negli ecosistemi associati a flussi di energia e materia, sono ovviamente irreversibili. Alla tendenza di procedere verso lo stato di equilibrio si contrappongono i processi indotti dal flusso virtuoso

dell'energia solare che tende invece a mantenere zone con bassa entropia rispetto all'ambiente. Per studiarne l'evoluzione utilizzando il linguaggio della termodinamica si impiega una forma di energia chiamata exergia che si identifica con il massimo lavoro che un sistema può eseguire quando viene portato in equilibrio con il suo ambiente. Nella sostanza l'exergia è una misura del lavoro potenziale di qualunque natura, meccanica, termica e utile sotto la forma di energia elettrica e chimica, derivante dal disequilibrio con l'ambiente. L'exergia può essere distrutta a differenza dell'energia di cui esprime la porzione utile.

Con una certa enfasi l'exergia viene considerata lo strumento più adeguato per valutare il deterioramento delle risorse naturali. Infatti le risorse energetiche, sono costituite da materia che non si trova in equilibrio con l'ambiente. Ad esempio una miscela di idrogeno ed ossigeno rappresenta una risorsa energetica sinché non ha luogo la reazione di combinazione che porta la miscela all'equilibrio termodinamico in cui è presente prevalentemente acqua. Si può, o meglio si potrebbe, estrarre la massima quantità di lavoro espressa dalla variazione di exergia se la reazione venisse condotta in modo reversibile in una cella a combustibile.

SCHEDA 9

La terra si può assimilare ad un sistema termodinamico aperto soggetto ad un flusso Φ di energia radiante proveniente dal sole che si trova alla temperatura della sua superficie T_S = 5800K. Essa viene restituita al cosmo sotto forma di radiazioni di minore qualità perché caratterizzate da una minore frequenza e quindi con un più elevato contenuto di entropia. In prima approssimazione si può assumere che valgano le condizioni di stazionarietà per cui i due flussi di energia

entrante ed uscente si possano assumere uguali. Contestualmente è presente un flusso di exergia che rappresenta il potenziale lavoro massimo che si può ricavare da tale flusso di energia, di qualunque forma: meccanica, termica e utile sotto la forma elettrica e chimica. Se indichiamo con w_k i diversi termini esprimenti il lavoro prodotto per unità di tempo nelle attività terrestri, naturali ed antropiche, si può allora scrivere la seguente equazione:

$$\Phi \left(1 - \frac{4\,T_0}{3T_s}\right) \approx \Phi^{Ex}_{back} + \sum_k w_k + T_0\,\sigma_{irr}$$

dove l'espressione fra parentesi al primo membro costituisce un fattore richiesto per trasformare il flusso di energia in un flusso di exergia. Φ^{Ex}_{back} è invece il flusso di exergia direttamente riflessa dall'atmosfera e dalla terra, T_0 è la temperatura della terra e σ_{irr} la produzione di entropia per unità di tempo già introdotta nel capitolo 3. Al secondo membro compare o la somma dei lavori effettuati dal flusso energetico assumendo che si svolgano in modo reversibile, mentre il terzo termine esprime la dissipazione per effetto delle irreversibilità.
Un calcolo dettagliato[12] evidenzia che il flusso di exergia radiante, solare ed extrasolare, che arriva sulla terra ammonta a circa 224·000 TW di cui 49·000 TW sono riflessi direttamente dall'atmosfera e dalla superficie terrestre. La quantità rimanente viene impiegata negli irreversibili processi naturali associati ai moti atmosferici e marini, e nelle trasformazioni fisiche e chimiche geologiche, Solo 90 TW vengono impiegati nei processi fotosintetici. L'exergia rimanente viene dissipata nell'ultimo termine al secondo membro dell'equazione a conseguenza delle irreversibilità. Nell'analisi precedente sono stati ignorati gli effetti di minore importanza derivanti dal lavoro gravitazionale e dai fenomeni nucleari terrestri.
In sostanza solo una parte della preziosa exergia proveniente dal sole viene utilizzata per produrre il lavoro utile associato ai processi fotosintetici che stanno alla base di quelli che intervengono nei sistemi viventi. In questo quadro emerge il grande merito della fotosintesi che indirizza parte del flusso dell'energia libera proveniente dal sole in una direzione virtuosa in virtù della quale si producono gli organismi complessi che emergono dai processi evolutivi dei sistemi naturali

ed antropici. Confermando che il pregio dell'energia solare non è tanto la sua quantità, ma la sua qualità.

Per concludere è interessante osservare che esiste un'analogia fra gli ecosistemi e le società umane che tendono verso gradi di maggiore complessità rendendo sempre più disponibili i beni di consumo, l'energia e i servizi. Esse crescono e si sviluppano incrementando la complessità della rete che esprime le interazioni e le retroazioni fra le sue diverse unità. La crescita contribuisce ad un allontanamento dalla condizione di equilibrio; lo sviluppo efficiente è quello associato all'aumento del livello dell'organizzazione con piccole dispersioni dell'energia. In sostanza ritroviamo una situazione familiare poiché simile al funzionamento delle macchine termiche il cui rendimento viene penalizzato dalle irreversibilità dei processi di scambio di materia e calore.

IL PERCORSO DELLO SVILUPPO

08.01 - Sviluppo e perplessità

Secondo la Commissione Brundtland (1987) i governi devono valutare in ugual misura il benessere di tutti i cittadini, presenti e futuri. Posizione difficile perché di futuro ce n'è troppo. Con una piccola dose di spregiudicatezza, potremmo contrapporgli la scanzonata affermazione di Groucho Marx: "Perché devo fare qualcosa per i posteri visto che non faranno niente per me?" .

Il panorama sociale è sempre stato soggetto a incessanti mutamenti che ne hanno modificato le caratteristiche coinvolgendone tutte le sue componenti. La storia testimonia la continua appropriazione da parte dell'uomo di beni naturali a danno di altre specie, senza limiti di utilizzo delle risorse. Le materie prime della vita, cibo, acqua, carburanti e fibre sono sempre state saccheggiate per sostentare una popolazione in aumento ed un crescente livello di consumi. Pertanto si può dare credito ad una concezione antropocentrica della storia nella quale l'uomo ha fatto la parte del leone.

Come già menzionato il primo avvertimento sul pericolo di questa situazione è venuto nel 1798 da parte di Thomas Malthus, secondo il quale il depauperamento delle risorse del pianeta dovuto alle attività produttive le avrebbe rese insufficienti per alimentare la popolazione per cui l'umanità sarebbe andata incontro ad una grave carestia. Paradossalmente, in concomitanza al messaggio malthusiano è decollata la rivoluzione industriale nella quale, grazie all'impiego di processi produttivi innovativi ha avuto luogo un impressionante sviluppo economico che ha creato i presupposti per un benessere generalizzato. I nuovi impianti industriali

riguardanti i processi estrattivi, quelli di fabbricazione dei manufatti e i nuovi mezzi di trasporto, impiegavano una grande quantità di risorse energetiche e materiali, con emissioni di rifiuti gassosi, liquidi e solidi che aumentavano il livello dell'inquinamento. Negli ultimi anni questa situazione si è accentuata per cui la storia del pianeta è entrata in un'era battezzata antropocene per evidenziare la responsabilità dell'uomo sui cambiamenti dell'ambiente. In sostanza per ironia della sorte il successo dell'umanità nell'appropriarsi dei beni della terra sembrerebbe contenere anche il germe del suo collasso dovuto al saccheggio e alla distruzione dell'ambiente naturale, sempre più' difficile da controllare.

08.02 - **Il ruolo costruttivo dell'energia**

La civilizzazione e la vita stessa traggono la linfa del loro sviluppo dalla cattura e dall'appropriato utilizzo dell'energia, il cui consumo aumenta il grado di benessere. Questo risultato è confermato dall'impiego di un opportuno indice, detto di sviluppo umano che oltre al prodotto interno lordo di un determinato paese tiene conto anche dei fattori sociali e culturali[1]. In sostanza il benessere richiede un adeguato consumo di energia, pur essendoci paesi quali gli Stati Uniti, che ne fanno un uso eccessivo.

La storia dell'uomo in un certo senso si identifica con quella delle scoperte e dell'impiego delle risorse energetiche necessarie per supportare lo stile di vita delle comunità sociali aumentando il loro livello di organizzazione in virtù del quale emergono comportamenti coerenti che esercitano funzioni collettive. I sistemi socio-economici si sviluppano aumentando la loro differenziazione attraverso la presenza di gradienti delle risorse, delle monete e delle idee che producono dei flussi simili a quelli di materia ed energia presenti nella termodinamica. In questo scenario l'appropriato

utilizzo dell'energia non costituisce il problema dello sviluppo, ma la sua soluzione. Pertanto se da un lato dobbiamo contrapporci alle tendenze a limitarne l'impiego, dall'altro dobbiamo operare perché ne venga fatto un uso appropriato che diminuisca le dissipazioni associate all'irreversibilità presenti nei processi naturali. Riemerge pertanto la lezione di Carnot che ci ha insegnato a calcolare il limite dell'efficienza delle trasformazioni del calore in lavoro, offrendoci un punto di riferimento per ogni azione in proposito. La macchina a vapore di Newcomer aveva una efficienza dell'1%, quella di Watt del 10%, un motore a combustione interna raggiunge il 30% ed un moderno ciclo combinato con una turbina per produrre elettricità raggiunge un rendimento del 60%. Questi risultati mettono in evidenza il progresso che può essere conseguito operando in tale direzione.

08.03 - **Processo all'energia**

Il sistema climatico del nostro pianeta comprende un insieme intrecciato di meccanismi di elevata complessità poiché l'atmosfera è in continuo movimento, scambiando materia, prevalentemente acqua, ed energia con gli oceani e le terre emerse. Le più vistose manifestazioni di questi scambi sono gli uragani, i cicloni e le inondazioni tropicali.

L'esteso impiego delle sorgenti fossili ha complicato ulteriormente la situazione suscitando molte inquietudini poiché i sette miliardi di tonnellate di anidride carbonica immesse ogni anno nell'atmosfera contribuiscono ad aumentare la temperatura a conseguenza del menzionato effetto serra. Anche se la questione presenta aspetti controversi è indiscutibile che negli ultimi 150 anni abbia avuto luogo un aumento della concentrazione della anidride carbonica che è passata dalle 280 parti per milione presenti prima della rivoluzione industriale alle 396 attuali. Concomitantemente la

temperatura media terrestre è aumentata di circa 0,8^{0}C. Tale riscaldamento è più pronunciato nelle regioni polari, in particolare in quella Artica, con conseguente parziale fusione dei ghiacciai che influenza la circolazione atmosferica grazie alla quale l'energia termica viene distribuita sulla superficie terrestre. I maggiori timori riguardano però la possibilità di evoluzioni catastrofiche dovute a meccanismi di retroazione. Tipico è il disgelo degli idrati di metano presenti nei margini continentali artici che liberando un gas serra nell'atmosfera contribuiscono ulteriormente al riscaldamento superficiale.

Le previsioni sull'evoluzione dell'atmosfera vengono condotte mediante modelli matematici, chiamati *General Circulation Models* (GCM), che includono i processi dinamici atmosferici e le trasformazioni cui sono soggetti i diversi componenti chimici presenti nella stessa atmosfera[(2)] .

I segreti del clima sono contenuti nell'equazione della dinamica dei fluidi di Navier-Stokes che risulta però troppo complessa per essere risolta in termini generali per via analitica per cui vengono impiegate sofisticate tecniche di calcolo numerico (SCHEDA 10). In realtà essa rappresenta solo una parte del puzzle climatico nel quale intervengono altri processi che riguardano gli scambi di energia e le trasformazione chimiche che si svolgono nella zuppa atmosferica.

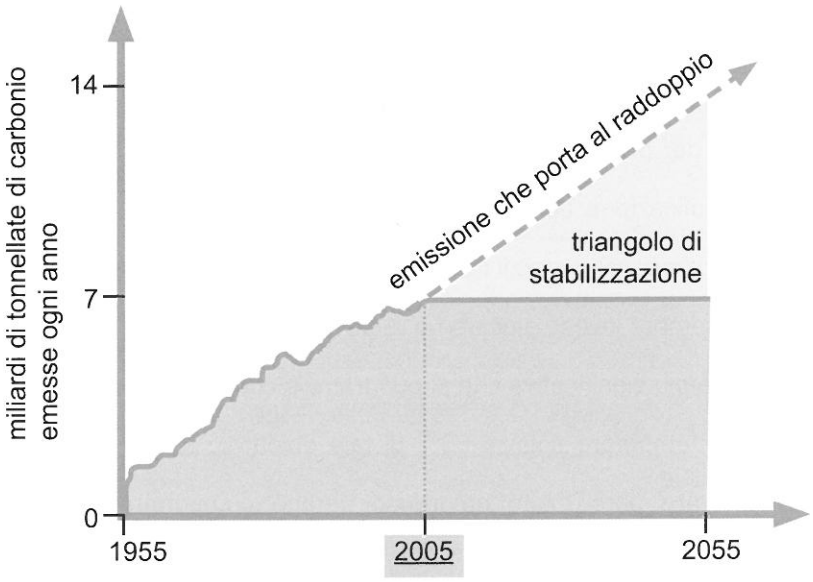
Le incertezze dei risultati ottenuti sono dovute oltre che dalla non linearità delle equazioni coinvolte anche ai dati inseriti che riguardano il dettaglio della struttura della superficie terrestre, la presenza di nubi costituite da vapor d'acqua e le emissioni vulcaniche. Malgrado tali incertezze è innegabile che esista un riscaldamento globale in corso dovuto alle emissioni di anidride carbonica antropogeniche, che impongono la necessità di prendere contromisure per impedire al sistema climatico di

sfuggire al nostro controllo.

"Tutti parlano del tempo atmosferico, ma nessuno fa niente per lui" diceva Mark Twain. Da qualche tempo però qualcuno ci sta provando tanto da far nascere una nuova professione, quella degli ingegneri climatici il cui scopo è di tentare di controllare il clima con tecniche radicali. Si dividono in due ampie categorie, una dedita alla rimozione della CO_2 (*Carbon Dioxide Removal*) e l'altra volta a bloccare artificialmente la radiazione solare per tenere più freddo il pianeta (*Solar Radiation Management*). La prima coinvolge operazioni provvide quali l'ampliamento delle foreste o più incerte quali la cattura dell'anidride carbonica stessa mediante assorbimento in opportune soluzioni basiche e sua sequestrazione in località sotterranee. I cultori delle tecniche SRM seguono strade diverse, da quella più ambiziosa di impiegare giganteschi specchi suborbitali a quella più familiare di dipingere in bianco le autostrade e i tetti per riflettere la radiazioni. Prendendo come modello il fatto che l'esplosione del vulcano Pinatubo, avendo disperso nell'atmosfera milioni di tonnellate di zolfo riflettente le radiazioni solari, ha diminuito la temperatura media del pianeta di circa mezzo grado centigrado, pensano di imitarlo versando nei cieli tonnellate di zolfo. Con il pericolo però di provocare dannose piogge acide. Come alcuni medici dei tempi passati questi neoingegneri rischiano con le loro ricette di essere più nocivi che utili al loro paziente.

Pertanto, più realisticamente partendo da ragionevoli previsioni sulla crescita economica dei prossimi anni, e quindi sulla quantità di energia che dovrà essere prodotta, si cerca di individuare dei cammini lungo i quali venga fissato l'impiego dei combustibili fossili in modo compatibile con la stabilizzazione dell'anidride carbonica ad un livello assegnato. In sostanza se si fissa il valore della quantità che si vuole sia presente nell'atmosfera

(un valore opportuno sembra essere 400 ppm) si determina anche il limite di energia che può essere prodotto da combustibili fossili. I risultati dei calcoli vengono riportati sul diagramma seguente, detto di Pacala-Socolow[3], le cui ordinate danno la quantità di anidride carbonica riversata nell'atmosfera in miliardi di tonnellate all'anno e le ascisse l'anno nel quale viene considerata l'emissione.



La curva superiore che prosegue con una tratteggiata si riferisce alla situazione chiamata BUA (*Business as Usual*) nella quale non sono contemplati provvedimenti per limitare l'emissione di anidride carbonica. In corrispondenza di circa 7 miliardi di CO_2 si assume di controllare l'emissione procedendo lungo il tratto orizzontale. Il triangolo compreso fra le due linee viene detto di stabilizzazione, e definisce la zona proibita ai combustibili fossili nella quale l'energia deve essere prodotta con fonti diverse ma *carbon free* ovvero senza emissione di CO_2 in modo che il suo livello si mantenga inalterato. Si tratta allora di lottizzare tale area in

una serie di contributi corrispondenti a diverse tecnologie che includono oltre al miglioramento dell'efficienza, l'aumento delle sorgenti rinnovabili e un'eventuale adeguata collocazione della fissione nucleare.

In tale impostazione è stata condotta una ricerca[4] nella quale viene presa la California come riferimento per condurre un studio dettagliato inteso ad individuare il cammino più conveniente per ridurre l'impiego di combustibili fossili al 20% entro il 2050. I risultati ottenuti evidenziano che per raggiungere tale obiettivo è necessario effettuare una profonda revisione delle infrastrutture includente un significativo miglioramento dell'efficienza dei processi in cui viene prodotta e utilizzata l'energia, un'ampia elettrificazione del trasporto, ed infine un largo impiego delle energie *carbon free,* compreso il nucleare. L'impiego diffuso delle sorgenti fotovoltaiche sembra invece giocare un ruolo modesto.

La conclusione più significativa che si può trarre è che con i mezzi attuali si riesce ad ottemperare solo al 60% di tale obiettivo, che in realtà si deve considerare però molto ambizioso perché comporterebbe una severa limitazione dei combustibili fossili. Le trasformazioni che devono essere effettuate richiedono tecnologie non ancora commercializzate ed un profondo coordinamento degli investimenti. Inoltre l'ampio sviluppo di infrastrutture implica l'acquisizione di nuove tecnologie.

In sostanza dovrebbero intervenire profondi cambiamenti per alcuni aspetti incerti, con risvolti economici non indifferenti. Poiché essi riguardano una delle aree mondiali più ricche e con elevata concentrazione tecnologica la possibilità di un'estensione a tutto il pianeta appare improbabile. Purtroppo se la California non può fare di meglio è difficile che qualcun altro la possa superare. Non dimentichiamo però che l'obiettivo imposto era molto ambizioso per cui i risultati ottenuti devono essere commisurati

a situazioni più realistiche. Infatti non si può fare a meno di osservare che anche le più pressanti iniziative riguardanti i problemi ambientali risultano frustrate dalla presente crisi economica.

SCHEDA 10

L'idea vincente per descrivere mediante la matematica il moto di un fluido è dovuta al principe dei matematici, Leonard Eulero, che ha assimilato il flusso di particelle ad un campo continuo in ogni punto del quale e per ogni particolare valore del tempo, è definito un valore della velocità. Si applica quindi la legge di Newton in base alla quale la forza è uguale al prodotto della massa per l'accelerazione. L'approccio è risultato però di limitata applicabilità ai problemi reali per aver trascurato la presenza di resistenze interne al fluido stesso. Successivamente Claude-Louis Navier, un ingegnere francese, e George Stokes, un matematico irlandese, introdussero tali effetti pervenendo ad una equazione che in forma concisa si può scrivere come segue:

$$\rho \times accelerazione = -\nabla P + f + f_{visc}$$

$$accelerazione \equiv \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla v)v$$

Il membro a sinistra esprime l'accelerazione di una piccola massa di fluido, mentre quello a destra rappresenta la forza che agisce su di essa. v è la velocità, ρ la densità, P la pressione, f la forza esterna per unità di volume dovuta alla gravità, ed f_{visc} la forza per unità di volume derivante dalle resistenze interne dovute all'attrito per effetto della viscosità. L'espressione dell'accelerazione deriva dal menzionato approccio di Eulero che tiene conto che in ogni punto dello spazio esiste un valore specifico della velocità la cui variazione influisce sull'accelerazione.
Si tratta di una equazione differenziale non lineare per la presenza del termine $v \cdot \nabla v$, che ha letteralmente dato inizio ad un'epoca nello sviluppo della cultura scientifica, sia per i suoi contenuti matematici (presso il Clay Institute è giacente un premio di un milione di dollari per chi ne sappia offrire una soluzione generale) che

a situazioni più realistiche. Infatti non si può fare a meno di osservare che anche le più pressanti iniziative riguardanti i problemi ambientali risultano frustrate dalla presente crisi economica.

SCHEDA 10

L'idea vincente per descrivere mediante la matematica il moto di un fluido è dovuta al principe dei matematici, Leonard Eulero, che ha assimilato il flusso di particelle ad un campo continuo in ogni punto del quale e per ogni particolare valore del tempo, è definito un valore della velocità. Si applica quindi la legge di Newton in base alla quale la forza è uguale al prodotto della massa per l'accelerazione. L'approccio è risultato però di limitata applicabilità ai problemi reali per aver trascurato la presenza di resistenze interne al fluido stesso. Successivamente Claude-Louis Navier, un ingegnere francese, e George Stokes, un matematico irlandese, introdussero tali effetti pervenendo ad una equazione che in forma concisa si può scrivere come segue:

$$\rho \times accelerazione = -\nabla P + f + f_{visc}$$

$$accelerazione \equiv \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla v)v$$

Il membro a sinistra esprime l'accelerazione di una piccola massa di fluido, mentre quello a destra rappresenta la forza che agisce su di essa. v è la velocità, ρ la densità, P la pressione, f la forza esterna per unità di volume dovuta alla gravità, ed f_{visc} la forza per unità di volume derivante dalle resistenze interne dovute all'attrito per effetto della viscosità. L'espressione dell'accelerazione deriva dal menzionato approccio di Eulero che tiene conto che in ogni punto dello spazio esiste un valore specifico della velocità la cui variazione influisce sull'accelerazione.
Si tratta di una equazione differenziale non lineare per la presenza del termine $v \cdot \nabla v$, che ha letteralmente dato inizio ad un'epoca nello sviluppo della cultura scientifica, sia per i suoi contenuti matematici (presso il Clay Institute è giacente un premio di un milione di dollari per chi ne sappia offrire una soluzione generale) che

per le sue applicazioni ai problemi più svariati, primo fra tutti la progettazione degli aerei, e più recentemente la previsione del clima.
Vista dallo spazio la terra appare come una sfera con chiazze bruno-verde a contatto con le zone azzurre dei mari, immersa in una coltre bianca dovuta alla presenza dell'atmosfera ai cui moti sono dovute le vicissitudini climatiche di diversa natura e intensità. Nel 1922 il matematico Lewis Fry Richardson pubblicò un pionieristico modello costituito da una serie di equazioni la cui soluzione avrebbe permesso di valutare in funzione del tempo e dello spazio le componenti delle velocità dei venti, la temperatura, la pressione e i valori delle concentrazioni dei diversi componenti. L'equazione di Navier-Stokes, opportunamente scritta per tenere conto della compressibilità dei gas atmosferici e del moto rotatorio della terra, ne occupa una posizione di primo piano unitamente a quelle che esprimono i bilanci dei diversi componenti presenti nell'atmosfera e il bilancio energetico che comprende oltre agli scambi di calore fra l'atmosfera, la terra e i mari anche il flusso di energia che viene catturata dai gas serra dalla radiazione solare.
In realtà la soluzione dell'insieme delle equazioni differenziali così ottenute può essere perseguita solo per via numerica discretizzando lo spazio mediante una griglia avente una risoluzione dell'ordine di 50 Km e fruendo di particolari modelli parametrici per descrivere le condizioni al contorno fra le diverse fasi in gioco (atmosfera, terra, mare) e la turbolenza. Per queste ragioni la soluzione dei modelli climatici globali richiede enormi risorse di calcolo. Ne consegue che dovettero passare parecchi anni prima che il modello, grazie all'avvento dei supercalcolatori, potesse offrire le prime, timide, previsioni meteorologiche. Nel 1984 il matematico Edward Lorenz ha però dimostrato che un sistema dinamico non lineare come quello atmosferico fornisce risultati molto diversi in seguito a variazioni molto piccole delle condizioni iniziali. Questa situazione riguarda specificamente il comportamento dell'atmosfera la cui evoluzione risulta estremamente sensibile all'accuratezza con cui si specificano i dati iniziali, che pertanto pongono un limite oltre il quale non è possibile fare previsioni. In sostanza il mondo di per sé sarebbe matematico se non ci fosse la natura a metterlo sottosopra. Per questa ragione attualmente le

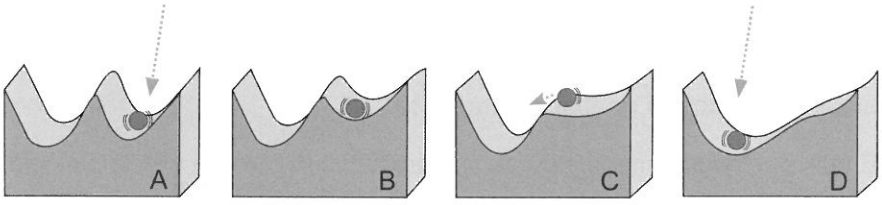
previsioni meteorologiche non si estendono al di là di una quindicina di giorni.
Con queste pregiudiziali appare opinabile fare previsioni climatiche che si estendano per qualche decina di anni. In realtà il problema che si deve affrontare riguarda soprattutto in che misura l'accumulo della CO_2 nell'atmosfera, valutata con ragionevoli ipotesi, possa influenzare l'aumento della temperatura media del pianeta negli anni futuri. Per le ragioni menzionate i risultati dei calcoli ottenuti con potenti calcolatori manifestano vistose fluttuazioni della temperatura. Tuttavia se vengono mediate si ottengono curve ascendenti nel tempo, ciascuna dipendente dalle sottostanti ipotesi sulle emissioni e sull'eventuale controllo dell'anidride carbonica prodotta nei processi di combustione. Molte di queste informazioni provengono dagli studi condotti presso l'IPCC (*Intergovernamental Panel of Climate Change*, organismo dell'ONU) che sforna periodicamente curve aggiornate dell'andamento della temperatura media, ciascuna corrispondente ad un particolare scenario. All'incirca risulta che senza interventi sulle politiche di emissione l'aumento medio della temperatura nel 2050 sfiorerebbe 1,5 ^{0} C. Si tratta di un risultato che, va considerato con attenzione, anche se per le incertezze menzionate ha alimentando accese discussioni.

08.04 - I pericoli di un pianeta inquieto

È opinione largamente condivisa che nel futuro la scienza e la tecnologia dovranno concentrarsi sulle trasformazioni cui è soggetto il nostro pianeta in seguito all'insorgenza di situazioni critiche che ne compromettono la stabilità. Tutto ciò partendo dalla consapevolezza che le tecnologie offrono nel contempo la possibilità di acquisire un numero sempre più elevato di informazioni sperimentali riguardanti sia i sistemi naturali che quelli creati dall'uomo e di elaborarli mediante calcolatori sempre più potenti, grazie all'impiego di opportuni modelli. Tuttavia permangono incertezze sull'affidabilità delle previsioni effettuate su tempi lunghi e su sistemi

di ampie dimensioni, quasi a convalidare l'affermazione ironicamente provocatoria dell'economista Bruno De Finetti: "Un modello matematico è un modo per complicare le cose semplici mediante l'inutile". In realtà la scienza e la tecnologia non possono prescindere dall'utilizzo di modelli, essendo costoso e talora impossibile lavorare sui sistemi reali.

Una situazione comune riguarda un sistema[5] che può trovarsi in due possibili stati di equilibrio posti alla base di due bacini di attrazione separati da una collina, come illustrato nella figura seguente chiamata "*stability landscape*" (paesaggio di stabilità). Se i due stati corrispondono a condizioni di equilibrio stabile, vengono detti attrattori poiché in seguito a relativamente piccoli spostamenti il sistema tende a ricuperare in modo autonomo la configurazione iniziale. Viceversa un punto alla sommità della collina di separazione rappresenta ancora un punto di equilibrio ma instabile, poiché in seguito ad un piccolo spostamento ritorna in modo autonomo verso uno dei due attrattori.



Le ricerche sono intese ad individuare come le condizioni esterne cui è soggetto il sistema influenzano il paesaggio diminuendo l'altezza della collina e rendendo così possibile il graduale passaggio da uno stato stabile A all'altro D che ha caratteristiche del tutto diverse. La situazione è molto comune e riguarda ad esempio il clima, l'inquinamento ambientale, il passaggio dalla ricchezza alla povertà. In questo quadro viene impiegato il termine resilienza, esprimente l'ampiezza del disturbo che un sistema

può tollerare prima di subire la transizione verso un altro stato. Con una prospettiva più ampia, avente risvolti sociali ed ecologici, la resilienza riflette la capacità di un sistema di assorbire un disturbo e riorganizzarsi mentre sta subendo un cambiamento, mantenendo essenzialmente le stesse funzioni, la stessa struttura e identità.

Rientrano ovviamente nel quadro precedente anche i modelli climatici che includono i menzionati processi dinamici atmosferici e oceanici con i corrispondenti scambi di materia ed energia, ma vengono affrontati anche problemi riguardanti eventi naturali aventi caratteristiche estreme, quali le intense precipitazioni, gli elevati sbalzi di temperatura, le violente perturbazioni atmosferiche e i terremoti, per esplorare i possibili interventi atti a ridurre i rischi a persone e cose. L'emergenza di situazioni critiche viene perseguita analizzando le fluttuazioni delle deviazioni standard dai valori corrispondenti alla distribuzione normale. L'impegno sperimentale viene quindi volto alla raccolta di osservazioni coerenti ed accurate, su lunghi periodi e con una buona copertura territoriale dalla cui analisi sia possibile individuare gli indizi di evoluzioni in atto.

Nel quadro precedente è legittimo interrogarci se la nostra società possa essere sconvolta da un disastro dovuto ad effetti perversi del proprio successo tecnologico, amplificati dalle caratteristiche chimico fisiche del pianeta su cui viviamo che possono dare origine ad un anomalo aumento della temperatura che a sua volta attraverso processi di retroazione potrebbe provocare evoluzioni indesiderate. Tipica è la menzionata liberazione di metano dai suoi idrati con l'acqua che popolano i sedimenti marini delle regioni artiche.

Purtroppo il livello dell'anidride carbonica presente nell'atmosfera sta aumentando con continuità malgrado i targets imposti dal protocollo

di Kyoto, dimostrando l'inefficienza delle costose iniziative sino ad ora intraprese. Perseguendo tale percorso l'approccio più semplice sarebbe di innalzare la quota delle tasse sulle emissioni, con lo scopo di promuovere indirettamente lo sviluppo tecnologico. Sino ad ora però esso ha portato a risultati modesti, come testimoniato ad esempio dal faticoso decollo degli auspicati processi di cattura dell'energia solare, per le vie termodinamica e fotovoltaica. Inoltre le accurate simulazioni sugli effetti derivanti dall'imposizione di limiti severi sull'impiego dei combustibili fossili, come per il menzionato caso della California, evidenziano la difficoltà di attuarli anche in paesi ricchi e tecnologizzati. Qualcuno, malignamente, osserva che se si tentasse di applicarli a livello mondiale rischierebbero di trasformare un pericolo incerto in una sicura catastrofe economica. Non a caso le proposte estreme degli ingegneri climatici includenti schermi solari, il ricoprimento dei deserti con teli di plastica, la fertilizzazione degli oceani e così via, lasciano perplessi, suggerendoci di affrontare in modo diretto il problema attraverso la cattura e la sequestrazione dell'anidride carbonica. In realtà questa tecnica dopo essere stata oggetto di studi e ricerche ha perso molto del suo fascino per le difficoltà di realizzarla in modo opportuno. Curiosamente le principali obiezioni provengono dagli ambientalisti che ne mettono in dubbio l'efficacia e la sicurezza oltre all'eccessivo costo.

È pertanto necessario essere consapevoli che il controllo del clima del pianeta richiede una rivoluzione profonda che coinvolge oltre agli aspetti scientifici e tecnologici anche, e soprattutto, quelli culturali che comportano profonde modifiche del nostro comportamento sociale.

Un aspetto significativo che emerge dalle menzionate simulazioni sulle limitazioni di impiego dei combustibili fossili riguarda la necessità di introdurre grossi cambiamenti infrastrutturali che comportano, ad esempio,

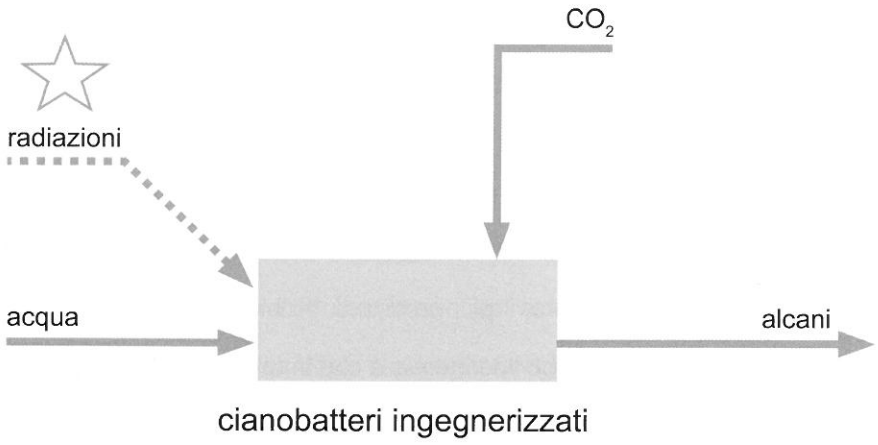
una profonda elettrificazione dei servizi, ma soprattutto nel trasporto dove attualmente viene utilizzato il 36% della produzione mondiale di energia. Pertanto si impiega una grande quantità di petrolio con emissioni di anidride carbonica potrebbero aumentare ad un livello tale da impedire l'imposizione di ogni ragionevole target sui limiti della sua concentrazione nell'atmosfera. Ne consegue che non esiste soluzione alla minaccia climatica se non si affronta il toro per le corna introducendo significativi cambiamenti nella gestione dei trasporti[6].

Studi approfonditi rivelano che la riduzione del consumo di combustibile in nuovi modelli di autovetture comporta notevoli spese per migliorarli e sino ad ora la diminuzione di consumo degli autoveicoli non ha costituito un fattore competitivo nella loro vendita. In sostanza anche se formulato nel periodo vittoriano, vale ancora il paradosso di Stanley Jevon: "È privo di senso ritenere che l'uso economico dei carburanti corrisponda ad una diminuzione dei loro consumi". Amaramente non si può fare a meno di constatare che sino ad ora i più pressanti problemi ambientali sono sempre entrati in conflitto con l'economia e che in questo ambito il settore automobilistico gioca un ruolo di primo piano.

Una strada alternativa è quella di avvicendare l'impiego del petrolio con i biocarburanti, senza però compromettere la produzione dei generi alimentari. Per questa ragione l'attenzione attuale è volta ai polisaccaridi, in particolare la cellulosa, che costituiscono il naturale sostegno delle piante in una quantità che può sfiorare il 90%. Tutto ciò, come già illustrato nel Capitolo 7, fruendo di batteri ingegnerizzati ottenuti mediante l'ingegneria metabolica, che permettono di ottenere polialcoli o idrocarburi saturi (alcani) direttamente dalla cellulosa senza passare attraverso gli zuccheri. Questo approccio avrebbe il vantaggio di lasciare sostanzialmente inalterate molte

delle infrastrutture riguardanti il trasporto, concernenti la distribuzione dei combustibili e il loro impiego. Inoltre la loro preparazione fruirebbe delle conoscenze della bioingegneria e della petrolchimica. Esistono molte ricerche e iniziative industriali di questo tipo, condotte soprattutto negli USA.

In questo quadro una nuova interessante prospettiva riguarda l'impiego di cianobatteri ingegnerizzati in grado di accelerare il processo fotosintetico con assorbimento dell'anidride carbonica dall'ambiente, operando secondo uno schema continuo come il seguente[7]:



Ricordando che i cianobatteri sono stati i primi organismi fotosintetici comparsi sulla terra, che non costituendo un sistema termodinamico isolato scambiano energia con l'ambiente esterno, il processo menzionato ripercorre la sintesi degli idrocarburi in un tempo molto più breve di quello con il quale in milioni di anni si sono formati i combustibili fossili dalle biomasse.

Nell'insieme pertanto la tendenza che sta emergendo è quella di adattarsi alle variazioni ambientali, ma nel contempo di intensificare le ricerche

in grado di favorire sviluppi tecnologici innovativi. Tutto ciò in accordo alle convinzioni dell'economista Jeffrey Sachs, ben attento a conciliare lo sviluppo con la sostenibilità, che ritiene che per salvare l'ambiente è necessario un insieme di soluzioni globali nel cui ambito le novità tecnologiche hanno un ruolo importante.

08.05 - **Sviluppo e necessità**

In economia lo sviluppo indica un processo complesso in virtù del quale una società evolve verso livelli sempre più elevati che includono oltre alla crescita, l'aumento della ricchezza e la trasformazione del modo di vivere attraverso l'educazione e il miglioramento del benessere. Pertanto è il risultato di una tendenza espansiva che per procedere richiede l'accumulo di capitale, il progresso tecnologico e in una certa misura la crescita demografica. Ma può continuare uno sviluppo pari a quello attualmente in atto? A questa domanda Arthur Schopenauer avrebbe risposto che non dobbiamo prendere i limiti della nostra visione come i limiti del mondo.

In realtà tale obiettivo deve essere perseguito con la consapevolezza della relazione che esiste fra i due concetti complementari di crescita e di sviluppo[8]. La crescita indica un'espansione quantitativa per assimilazione di materiali ed energia necessari per sostenere le attività economiche ordinarie e i consumi mentre lo sviluppo, facendo leva sui valori culturali, deve conferire maggiore complessità ai prodotti delle attività umane rendendoli più efficaci per gli impieghi e meno nocivi per l'ambiente. Pur sembrando elusiva, la complessità si può operativamente valutare mediante la definizione di Andrej Kolmogorov che la identifica con il più breve algoritmo necessario per generare un oggetto e quindi con l'informazione richiesta per progettarlo[9]. Su una scala superiore

essa coinvolge l'intero sistema produttivo con la creazione di una serie di connessioni in grado di operare cooperativamente[10]. Nella nostra società sono necessari entrambi, crescita e sviluppo, ma con il passare del tempo la prima deve cedere il passo al secondo.

Nell'intero sistema produttivo le connessioni fra le diverse attività che agevolano lo sviluppo identificano una rete che attraverso scambi di materia, energia e informazioni tende ad autorganizzarsi a livelli di complessità sempre più elevati. In termini economici le capacità dei centri produttivi a generare complessità vengono espresse mediante le intensità delle loro interazioni e la tendenza alla diversificazione. In questa impostazione i prodotti della tecnologia possono essere caratterizzati da due fattori:

il contenuto di informazione = I

il contenuto di materia = M,

per cui si può scrivere:

$$\frac{I}{M} \propto \frac{sviluppo}{crescita}$$

Se ripercorriamo la storia della tecnologia a partire dal decollo della rivoluzione industriale si può osservare che per lungo tempo sino all'inizio del Novecento, il rapporto precedente non è molto variato poiché all'aumentare delle dimensioni degli impianti aumentava anche il contenuto di informazione richiesto per la progettazione di dispositivi sempre più complessi che richiedono meccanismi di controllo sempre più sofisticati. Nella prima metà del Novecento la curva che ne rappresenta il rapporto in funzione del tempo si è impennata poiché con l'avvento della microelettronica, della informatica, delle biotecnologie e delle nanotecnologie è iniziato un processo di miniaturizzazione che ha prodotto dispositivi sempre più complessi e sempre più efficienti e quindi associati

a consumi di energia sempre più bassi. Ma soprattutto orientati verso l'utilizzo dell'energia elettrica, più qualificata di quella termica.

In un'analisi di più ampio respiro si deve tenere presente che tutte le strutture presenti nel nostro Universo, quali le galassie, le stelle, i pianeti, la vita e quelle costruite dall'uomo, costituiscono dei sistemi termodinamici operanti in condizioni di non equilibrio con flussi di energia in grado di fornire il lavoro necessario per costruirle. In questo quadro il flusso di energia in essi coinvolto potrebbe costituire un fattore unificante per offrire una spiegazione coerente dell'origine, dell'esistenza e della complessificazione dei diversi sistemi[11]. Più specificamente esso può essere espresso dal flusso di energia libera per unità di massa Φ_m (*energy rate density*). Limitando l'analisi all'evoluzione delle attività umane nel tempo si ottengono i valori riassunti nella tabella seguente[12]:

ATTIVITÀ	TEMPO (milioni di anni)	Φ_m (erg/s g)
caccia	300	4.10^4
agricotura	10	10^5
industriale	0,2	5.10^5
tecnologica	0	2.10^6

L'attuale situazione è caratterizzata da un largo impiego di mezzi di trasporto di alta tecnologia e di un ampio impiego dell'energia per il riscaldamento e per lo sviluppo di attività produttive. L'energia è però richiesta anche per le attività basate sull'informazione che fa largo uso di dispositivi elettrici ed elettronici, alimentati da sempre più complesse reti elettriche. Tutto ciò ha avuto come conseguenza un vistoso aumento del suo impiego, come appare dalla tabella precedente, che segue l'aumento di complessità delle attività umane.

08.06 - Antropocene: una metafora delle catastrofi annunciate

Il 31 ottobre del 2011 le Nazioni Unite hanno diffuso la notizia che il numero di abitanti del pianeta aveva raggiunto i 7 miliardi, facendo così emergere l'immagine di paesaggi gremiti di esseri umani, tali da suscitare nel contempo euforia, ma soprattutto sgomento. L'affollamento del pianeta sta infatti creando un quadro inquietante, definito una bomba biologica[13] poiché insidia la perfetta armonia della natura, pesando sull'avvenire del nostro pianeta rendendolo oggetto di profonde e irreversibili devastazioni. I geologi, accettando un suggerimento del premio Nobel Paul J. Crutzen[14], hanno sovvertito le consuetudini battezzando con anticipo, ed indiscutibile efficacia mediatica, antropocene l'era geologica in cui viviamo.

Nel 2008 una nutrita schiera di ricercatori che ha partecipato alla "*Catastrophic Risk Conference*" che si è tenuta ad Oxford, ha assegnato all'umanità vecchia di 200.000 anni il 19% di probabilità di sopravvivere oltre il 2100, in contrasto con le evidenze fossili in base alle quali la vita media dei mammiferi ammonta a circa un milione di anni. Ma per quali cause? La sovrappopolazione, il riscaldamento globale, e la mancanza di risorse.

Il primo pericolo viene facilmente ridimensionato da un calcolo che occupa il retro di una busta dal quale risulta che se si lascia a disposizione di ogni persona uno spazio paragonabile a quello che si gode in una tipica abitazione americana, tutta la popolazione mondiale, occuperebbe circa l'1% della superficie terrestre (pari all'incirca al territorio dell'Egitto) lasciando il terreno restante libero[15]. Le recenti ricerche demografiche dimostrano inoltre che pur essendo la popolazione ancora in crescita, sia però in atto un rallentamento, dovuto a ragioni culturali più che alla mancanza di risorse. Tale da far prevedere che intorno al 2050 abbia inizio

la diminuzione della popolazione stessa.

Nel prendere allora atto della potenziale ricettività del pianeta ci si deve allora chiedere se l'umanità sarà in grado di superare le altre difficoltà. Essendo stato stimato che il 99,9% delle specie animali apparse sulla terra sia scomparso ci si interroga se si tratti di un fenomeno che fa parte integrante della vita per cui sia legittimo assumere che anche la specie umana sarà destinata ad estinguersi come si è verificato per altre in seguito a catastrofi naturali o alla mancanza di mezzi di sostentamento. L'uomo differisce dalle altre specie viventi per l'intelligenza, frutto dell'evoluzione, che dovrebbe costituire il più efficace strumento per individuare i percorsi su cui avviare le attività che lo tutelino da repentine trasformazioni dell'ambiente. Anche perché esistono ragionevoli previsioni che fra pochi anni la potenza di calcolo a disposizione dell'umanità supererà nettamente quelle del cervello dell'uomo, che pertanto potrà disporre di un formidabile strumento per progettare e gestire sistemi molto complessi. Le nuove macchine di calcolo potranno anche suggerire come progettare risorse sintetiche che possano surrogare quelle attualmente impiegate[16].

Già all'inizio del Settecento Giambattista Vico aveva evidenziato che la storia procede attraverso corsi e ricorsi nei quali si alternano fasi di progresso e di decadenza. L'archeologia testimonia l'esistenza in diverse parti del mondo delle tracce di civiltà scomparse, ricche di contenuti culturali. Il destino di una civiltà ed il suo eventuale collasso è dovuto a diversi fattori di natura esogena quali i disastri naturali, o endogena quali la mancanza di flessibilità nell'adeguarsi ai cambiamenti ideologici e politici. La storia, anche se viene considerata maestra di vita, non procede linearmente per cui è difficile trarne insegnamenti sull'evoluzione della società attuale. Tuttavia è opportuno ricordare che Arnold Toynbee, che ha dedicato la vita

allo studio di tali problemi, ha affermato che le civiltà muoiono per suicidio, non per assassinio.

Ritenere che il nostro pianeta non sia mai cambiato costituisce un pregiudizio, fortunatamente non vero vista la tendenza del genere umano ad evolvere[17]. E non è neanche un pianeta fragile se si tiene conto delle vicissitudini attraverso le quali è passato, associate ad enormi sbalzi di temperatura e cambiamenti della composizione dell'atmosfera[18].

Bernard Shaw sosteneva che: "L'uomo ragionevole adatta se stesso al mondo: quello irragionevole persiste nell'adattare il mondo a se stesso. Pertanto tutto il progresso dipende dall'uomo irragionevole".

La tendenza che sta emergendo è comunque quella di adattarsi alle variazioni ambientali con un nuovo atteggiamento che coinvolga sia il comportamento umano sia l'intensificazione di ricerche in grado di favorire adeguati sviluppi tecnologici innovativi nei quali si migliori l'efficienza dei processi, si faccia ampio uso dell'energia elettrica e venga dato ulteriore sviluppo alle comunicazioni intensificando la rete informatica[19]. Si tratta di un una trasformazione epocale che richiederà tempo, un'adeguata educazione ed una consapevole maturità politica. Nel contempo le competenze in tale settore e l'accessibilità di potenti calcolatori potranno guidare l'impiego di reti intelligenti (*smart grid)* in grado di ottimizzare la produzione e la distribuzione dell'energia e la gestione e distribuzione dell'acqua. Un ostacolo è dovuto alla presenza di fattori sociali eversivi quali la violenza, il fanatismo sociopolitico e il terrorismo. Herbert George Wells il più profetico e creativo scrittore del ventesimo secolo, pur avendo diffuso in molti dei suoi romanzi la fiducia sull'applicazione delle scienze per risolvere i problemi del mondo, dopo la seconda guerra mondiale piombò in una visione pessimistica alimentata dal timore che si potesse cadere

in un declino causato dalla stessa follia umana autodistruttiva. Queste preoccupazioni trovano però sollievo nella lettura del recente volume di Steven Pinker: "*Better Angels of our nature: why violence is declined*"[20] nel quale con ricca documentazione viene messo in evidenza che la violenza umana è diminuita nei millenni, per cui stiamo vivendo il periodo più pacifico della storia. Il grande filosofo Leibnitz direbbe pertanto che ci stiamo avviando verso il "migliore dei mondi", ridicolizzato nel "*Candide*", del corrosivo Voltaire.

Nel 1931 in una visione ottimistica John Maynard Keynes[21] affermava la possibilità che nell'arco di un secolo si sarebbe raggiunta una situazione nella quale tre ore di lavoro al giorno sarebbero state sufficienti per soddisfare le necessità umane in modo adeguato. E ciò grazie alla capacità di controllare l'aumento della popolazione, di evitare guerre e tensioni sociali, di saper affidare alla scienza il compito dello sviluppo tecnologico ed infine di fissare il tasso di accumulazione del capitale nel margine fra produzione e consumo. Dopo quasi un secolo, sulla base di quanto precede, appare che i tre primi obbiettivi possano essere raggiunti mentre resta incognita la capacità di saper gestire l'economia in modo tale da eludere le insidie e gli ostacoli che si frappongono al raggiungimento di un benessere generalizzato.

È quindi quanto mai necessaria una *Governance* mondiale che riesca a conciliare l'interesse dei singoli con quello generale. Ma se pure auspicata essa appare ancora remota o addirittura utopica. L'economista Carlo Cipolla[22] in un suo divertente e provocatorio saggio inteso a definire le leggi fondamentali della stupidità umana, attribuirebbe ad essa gli impedimenti per realizzare l'obiettivo precedente. Purtroppo secondo Friedrich Schiller neppure gli dei la possono contrastare.

Crutzen ha riconosciuto che gli uomini rimarranno per millenni la maggior forza ambientale e che spetterà agli scienziati e agli ingegneri il compito di guidarli verso una gestione sostenibile dell'ambiente anche se si sta ancora calpestando una terra incognita. Non possiamo fare a meno di caldeggiare questo messaggio, ricordando che se l'intelligenza non esclude la stupidità, si deve operare in modo tale che nel conflitto la prima riesca a prevalere sulla seconda beffando gli stessi Dei.

CONCLUSIONI

Talora le discussioni sulle opzioni energetiche ricordano quei commensali che, pur essendo sazi perché hanno consumato un lauto pranzo, discutono sul menù del giorno successivo paventando il timore che esso non possa avere luogo. Giusto, perché del "doman non v'è certezza", recitava il Magnifico Lorenzo de' Medici.

In realtà sino ad ora la nostra società non ha mai sofferto di una vera crisi energetica, poiché le carenze che si sono manifestate in particolari situazioni erano dovute a fattori geopolitici o ad inadeguatezza delle infrastrutture. Sul piano economico l'elevato costo dell'energia che affligge i paesi che ne fanno ampio uso è dovuto in gran parte al fatto che essa offre il modo più diretto per rimpinguare le casse statali. Il timore della carenza di risorse è probabilmente ancestrale tanto che già nella preistoria si riteneva che la selce, impiegata per costruire utensili da taglio con scopi non sempre pacifici, fosse prossima all'esaurimento. In realtà l'umanità non sembra correre il rischio di un esaurimento delle risorse, almeno nel breve periodo, finché lo sviluppo potrà fruire di innovazioni tecnologiche. In accordo ad alcuni *opinion leaders* futurologi stiamo entrando in un'epoca di straordinarie scoperte grazie alle quali le capacità cognitive delle macchine si confonderanno con quelle umane attraverso una evoluzione culturale che procede con un meccanismo prevalentemente lamarkiano e quindi con retroazioni positive avente conseguenze straordinarie.

Purtroppo si deve tenere presente che l'incuria nella gestione delle risorse naturali rischia di creare situazioni irreversibili, destinate a lasciare una traccia indelebile sul pianeta. Ne consegue pertanto che con gli attuali

tassi di crescita se non si migliorano le attenzioni per diminuire il processo di inquinamento si potrebbe creare una situazione ecologicamente insostenibile. In questo quadro il progresso tecnologico diviene un fattore importante per controllare l'impatto sull'ambiente del comportamento umano. Purtroppo la tecnologia non procede linearmente per cui non è sempre in grado di offrire una soluzione per tutti i problemi che si devono affrontare, soprattutto nel momento in cui lo si desidera. In particolare se ci riferiamo alla produzione di energia da fonti rinnovabili, dobbiamo constatare che malgrado le enfatiche dichiarazioni e gli incentivi messi a disposizione i risultati ottenuti restano modesti poiché la produzione di energia si mantiene presidiata dai combustibili fossili.

Tuttavia si deve tenere presente che anche se i barili di petrolio, pur essendo ancora tanti, sono comunque limitati nel numero, i frutti del progresso scientifico permettono di surrogare l'impiego dei materiali naturali e diminuire l'impiego dell'energia. E ciò grazie ai miglioramenti dell'efficienza come ci ha insegnato il giovane Sadi Carnot quasi 200 anni fa ed al continuo sviluppo delle conoscenze scientifiche e tecnologiche. I loro risultati stanno alla base della prosperità dei paesi avanzati, ma sono ormai potenzialmente accessibili in ogni parte del mondo, poiché la loro trasmissione è favorita dalle tecnologie di rete in virtù delle quali la diffusione della cultura aumenta in modo esponenziale.

I problemi precedentemente sollevati, per la loro complessità, richiedono l'intervento di scienziati e tecnici per quanto concerne l'introduzione di nuove soluzioni ed il miglioramento di quelle esistenti, e di politici per promuoverne ed agevolarne l'applicazione oltre che trasferire all'opinione pubblica il messaggio di prepararsi a modificare il proprio stile di vita. Si deve però osteggiare la tendenza ad un'inversione delle parti nella

quale i politici coprano il ruolo degli scienziati sposando tesi o adottando procedimenti poco realistici o significativi.

Le iniziative più importanti sono:

i) Il miglioramento dell'efficienza dei processi energetici, attraverso il perfezionamento e lo sviluppo delle tecnologie in essi coinvolte.

ii) La creazione delle infrastrutture in grado di agevolare l'affermazione delle fonti rinnovabili.

iii) L'incentivazione della ricerca di soluzioni innovative attraverso l'affermazione di nuove tecnologie.

In realtà lo sviluppo tecnologico, che ha segnato la storia del genere umano, segue un cammino erratico poiché neppure gli scienziati sono in grado di prevedere l'influenza delle loro ricerche. Il secolo scorso è stato ricchissimo di innovazioni tecnologiche che stanno alla base dell'attuale stato di benessere dei popoli cosiddetti ricchi e sta trainando anche gli altri. A titolo di esempio vorrei ricordare che alcune scoperte nel settore chimico, quali la preparazione dei materiali polimerici e la sintesi dei fertilizzanti azotati hanno contribuito ad arginare la carestia alimentare. Entrambe hanno riscattato il depauperamento di alcune materie prime naturali tanto paventato dai seguaci del messaggio malthusiano. Inoltre il progresso nel settore farmaceutico ha affrancato l'umanità dall'incubo di gravi malattie.

Albert Einstein ha scritto: "La crisi è la più grande benedizione per le persone e le nazioni, perché porta a progressi. La creatività nasce dall'angoscia come il giorno nasce dalla notte oscura. È nella crisi che nasce l'inventiva, le scoperte e le grandi strategie."[1].

Sino ad ora il carburante non è mai mancato nelle pompe di benzina, anche se il suo prezzo è stato soggetto ad oscillazioni dovute a fattori speculativi e geo-politici, o a squilibri fra gli investimenti richiesti per

migliorarne l'estrazione e le richieste del mercato. Comunque le analisi su come reagire a possibili crisi energetiche devono essere affrontate con particolare attenzione verso le ricerche in grado di introdurre quelle innovazioni che saranno in grado di superarle[2]. Esse potranno emergere solo grazie alla diffusione della conoscenze scientifiche. Il fallimento è infatti figlio del ritardo culturale e del fatto che siamo prigionieri di schemi sclerotici e parassitari che non accettano il rischio frenando le sfide più impegnative.

APPENDICE A

L'evoluzione dell'entropia

Il termine entropia, che in greco significa trasformazione, sin dalla sua introduzione nel 1867 da parte di Rudolf Clausius ha sempre esercitato un fascino arcano. Terrorizza gli studenti alla vigilia dell'esame di termodinamica, coinvolge i filosofi impegnati a dare un senso alle trasformazioni naturali, eccita gli artisti alla ricerca di esoteriche ispirazioni e offre ai tecnici uno strumento per le loro progettazioni. Tanto che qualcuno propone di sostituire l'abusata espressione "crisi energetica" con la più pertinente "crisi entropica"[1], rivendicando così l'importanza della qualità dell'energia rispetto alla sua quantità.

Con lungimiranza Ludwig Boltzmann ha scritto "La lotta per l'esistenza degli esseri viventi non è per le materie prime, poiché sono presenti in eccesso nell'aria, nell'acqua e nel sottosuolo, né per l'energia che sotto forma di calore è presente ovunque, ma è invece la lotta per l'entropia che diviene accessibile dal flusso energetico proveniente dal caldo sole alla fredda terra".

L'impiego del secondo principio si può ricondurre alla seguente relazione esprimente il lavoro per unità di tempo w che si ottiene da una macchina termica che riceve il flusso di calore q dall'esterno (vedi SCHEDE 2 e 4):

$$w = \frac{T_1 - T_2}{T_1} q - T_2 \sigma_{irr}$$

Il termine σ_{irr}, che esprime l'aumento nel tempo della grandezza che viene chiamata entropia, diminuisce il rendimento che la macchina avrebbe se potesse operare in condizioni di reversibilità. Questo approccio si riconduce ad un'impostazione assiomatica della termodinamica che trae le sue radici

nel lavoro pubblicato da Clausius nel 1867. È sicuramente efficace, ma lascia però aperto il problema di dare un senso all'ineluttabile crescita dell'entropia che penalizza le nostre attività. L'astrofisico Arthur Eddington nel 1927 coglieva un importante aspetto di tale fenomeno, battezzando l'aumento dell'entropia con un efficace metafora, quella della freccia del tempo la cui orientazione indica la strada lungo la quale si svolgono gli eventi naturali.

James Maxwell, Ludwig Boltzmann e Willard Gibbs, tre stelle del firmamento scientifico, nella seconda metà dell'Ottocento si sono posti il compito ambizioso di interpretare le proprietà della materia e le sue trasformazioni sotto i vincoli imposti dal secondo principio, a partire dal comportamento delle particelle (atomi, molecole e ioni) di cui è costituita[2]. In accordo alla meccanica quantistica queste particelle possono avere solo ben definiti valori dell'energia fra i quali si distribuiscono in modo casuale. Si tratta di una situazione simile alla distribuzione di gettoni in diverse scatole ciascuna corrispondente ad un particolare valore dell'energia. Ogni possibile distribuzione definisce uno stato del sistema, che viene chiamato microscopico. In realtà poiché le particelle anche in condizioni di equilibrio sono in continuo movimento, con il trascorrere del tempo si scambiano l'energia per cui i diversi microstati si avvicenderanno continuamente. Ne consegue che per valutare le proprietà della materia si deve effettuare una media dei valori che competono a ciascun microstato e per tale scopo è opportuno attribuire a ciascuno di essi una probabilità, comportandoci quindi come se nel tempo in cui viene condotta una osservazione il sistema abbia la possibilità di percorrere tutti i suoi possibili microstati. Questa ipotesi, chiamata ergodica, si rivela di indiscutibile utilità anche se va applicata con cautela a sistemi complessi. Ciò premesso la probabilità p_j dello stato

i è espressa dal rapporto fra il numero di volte che tale stato si presenta in un numero molto grande di scelte diviso per il numero totale delle scelte stesse. Seguendo questa strada Gibbs ha dimostrato che l'entropia si può esprimere mediante la seguente relazione :

$$S = - k_B \sum_i p_i \log p_i$$

dove al secondo membro appare una sommatoria estesa ai logaritmi naturali delle probabilità di tutti i microstati, mentre k_B è una costante universale detta di Boltzmann, avente le dimensioni di una energia divisa la temperatura. Anche se ad un primo sguardo la formula precedente appare molto diversa da quella proposta da Clausius (SCHEDA 2), esprimente l'entropia come rapporto fra l'energia termica contenuta nel sistema e la temperatura, è possibile dimostrare che le due espressioni sono complementari. Infatti l'approccio di Gibbs ha aperto una finestra sul mondo microscopico offrendo la possibilità di valutare l'entropia e le diverse grandezze termodinamiche ad essa connesse, quale l'energia libera (vedi SCHEDA 3), a partire dalle conoscenze che ci sono note sulla struttura e comportamento dinamico delle molecole. Si sono così ottenuti i risultati necessari per individuare lo stato di equilibrio di un sistema termodinamico e per eseguire i calcoli concernenti i processi chimici ed energetici.

Le probabilità dei microstati dipendono dalla loro energia per cui in un sistema isolato ad energia costante avranno gli stessi valori. Infatti ricorrendo all'esempio precedente i microstati differiscono solo per la ridistribuzione dei gettoni fra le diverse scatole, vincolata dal fatto che la somma delle energie delle singole particelle deve rimanere costante. Le probabilità p_i risulteranno quindi uguali all'inverso del numero di stati Ω. Si tratta di una situazione simile a quella delle gettate di un dado, non

truccato, con sei facce ciascuna delle quali ha probabilità di uscita uguale ad un sesto. Poiché la somma delle probabilità è uguale ad uno si ricava facilmente:

$$S = k_B log\ \Omega$$

Questa formula, che si trova incisa sulla tomba di Boltzmann, motiva l'interpretazione dell'entropia quale misura dello stato di disordine di un sistema. Ad esempio in un cristallo ideale in cui tutti gli atomi occupano le ben definite posizioni che gli competono in un ben definito reticolo risulta che $\Omega = 1$. Si tratta infatti di una situazione ordinata che può essere realizzata in un solo modo nei solidi cristallini monoatomici allo zero assoluto. In questo caso l'entropia è nulla. Viceversa in un gas le molecole si muovono liberamente in un definito volume per cui esiste un certo grado di disordine associato alla occupazione di diversi microstati ed i valori di Ω, e di conseguenza dell'entropia, risultano elevati.

Non è facile capire cosa sia l'informazione e che cosa la renda così rivoluzionaria. L'unica cosa di cui siamo consapevoli è che c'è n'è troppa perché siamo continuamente bombardati da un enorme flusso di notizie diffuse da media tecnologicamente sempre più evoluti, ma purtroppo sempre meno trasparenti ed affidabili. A dare una veste quantitativa al concetto di informazione è stato Claude Shannon, un ingegnere dell'IBM, nel 1940 quando ha osservato che per ricavare quella contenuta in un messaggio si deve fare una scelta fra diversi segnali che si riferiscono ad eventi di diversa probabilità[3] L'informazione dipende infatti dal numero di decisioni binarie, o *bit*, che rappresentano la scelta fra due alternative richieste per definire la configurazione di un determinato sistema. Per fare un esempio riferiamoci al caso specifico di otto oggetti, ad esempio carte,

di cui se ne deve scegliere una specifica. Se si divide il mazzo in due parti di quattro carte ciascuno la prima scelta binaria riguarda l'individuazione di quello dei due che contiene la carta di riferimento. Procedendo nella divisione in due parti è facile rendersi conto che con tre scelte binarie si può individuare la carta desiderata. Generalizzando, se su Ω oggetti vengono effettuate I scelte risulta che $\Omega = 2^I$,ovvero:

$$I = \frac{1}{log2} log\ \Omega = 1{,}4427\ log\ \Omega = S_I$$

Questa relazione è densa di significati perché evidenzia che fra il numero delle scelte che permettono di definire il sistema e quello degli elementi in esso presenti intercorre una relazione simile a quella di Boltzmann, se si esclude la sostituzione della costante k_B con un numero adimensionale. Il primo termine rappresenta l'informazione che ci è richiesta per identificare il sistema stesso. Poiché tanto è maggiore tanto è più grande il numero di scelte che si devono fare l'ultimo membro viene definito entropia di informazione.

Con il moltiplicarsi delle possibilità di scelta la situazione diviene più complessa poiché le scelte devono essere suddivise in diverse sottoserie per cui il valore dell'entropia deve essere valutato mediante una formula formalmente uguale a quella di Gibbs, salvo l'assenza della costante di Boltzmann. Si osservi che l'entropia di informazione così ottenuta ha un carattere astratto poiché è priva di dimensioni. Tuttavia qualche anno dopo il lavoro di Shannon, Rolf Landauer e Charles Bennett, entrambi dell'IBM, dimostrarono che i *bit* hanno in realtà un contenuto fisico poiché la loro cancellazione richiede una spesa di energia che viene dissipata producendo entropia. In sostanza i *bit* non sono astrazioni perché legati a

fatti fisici concreti quali i buchi di una carta perforata, lo stato di un neurone, la configurazione del DNA, lo spin up o down di una particella. Questa constatazione ha rimosso quella patina di elusività che li circondava, e li ha resi simili alle particelle della meccanica statistica.

Lasciandoci allora trasportare dalla speculazione possiamo tentare di valutare il numero di *bit* presenti in tutto l'Universo a noi visibile contenuto in una sfera di raggio uguale al prodotto della velocità della luce per il tempo trascorso dal big-bang. Se eguagliamo la sua entropia di informazione con quella della termodinamica espressa dalla formula di Clausius in cui si è attribuito all'energia il valore che si ricava dalla nota formula di Einstein, si ricava[4] :

$$I = \frac{Mc^2}{k_B T \log 2} \approx 10^{120}$$

essendo M la massa dell'Universo, ottenuta moltiplicandone il volume per la densità osservata, e c la velocità della luce. Si tratta di un numero enorme, ma comunque finito. Ci fornisce il numero di *bit* gestiti in un calcolatore avente le dimensioni dell'Universo intero. L'unico che alla domanda "Saremo in grado di ricostruire il big-bang?" risponderebbe laconicamente: "**Fiat lux**!".

All'euforia di una simile prospettiva subentra però la frustrazione se ci chiediamo quanti *bit* sono necessari per costruire una proteina tipica contenente 200 aminoacidi. Poiché nelle proteine biologiche esistono 20 tipi di aminoacidi e poiché esistono venti scelte per ciascuna posizione, ne consegue che il loro numero ammonta a $20^{200} \approx 10^{260}$, numero molto superiore al numero di *bit* precedentemente valutato. Pertanto solo una piccola parte di esse può essere stata costruita nella storia dell'Universo,

mentre quelle esistenti sono tipicamente uniche perché formatisi attraverso particolari percorsi[5]. Detto in termini più esoterici l'Universo in cui viviamo è ben lontano dall'ergodicità e la sua esplorazione presenta ancora risvolti arcani.

Quanto precede apre sicuramente stupefacenti prospettive, ma lascia insoluto lo spinoso problema di giustificare l'aumento cui è soggetta l'entropia nelle trasformazioni irreversibili, con tutte le conseguenze da essa derivanti inclusa quella contemplata dalla formula posta all'inizio della trattazione[6]. In realtà a questo quesito ha dato una risposta Boltzmann in un suo formidabile lavoro del 1872, nel quale si descrive l'evoluzione dei sistemi termodinamici combinando la statistica con la dinamica delle collisioni molecolari. Non a caso egli era un grande ammiratore di Darwin e si proponeva di descrivere l'evoluzione dei sistemi fisici in analogia a quanto aveva fatto per i sistemi viventi. Nella sua indagine si è riferito ad un gas rarefatto contenente circa 10^{24} molecole che trovandosi in una condizione lontana da quella di equilibrio, ad esempio per la presenza di un gradiente della pressione, evolve naturalmente verso lo stato nel quale la pressione risulta uniforme. L'enorme numero di molecole impedisce di descrivere i moti individuali delle molecole imponendo l'impiego di un approccio statistico che opera sui valori medi delle posizioni e velocità delle particelle, valutando quindi come si modificano nel tempo per arrivare alla configurazione di equilibrio. Il merito di Boltzmann è di avere saputo conciliare la statistica con la dinamica molecolare, esprimendo l'influenza su tale processo di rilassamento dello scambio di energia fra coppie di molecole che subiscono una collisione. Il calcolo viene effettuato mediante la meccanica classica newtoniana, strettamente deterministica, per cui se

si specifica ad un certo istante la posizione e la velocità di tutte le particelle dell'Universo risulta possibile determinare esattamente dove si troveranno in ogni momento successivo. Tecnicamente la sua analisi è ricondotta all'integrazione di un'equazione integro-differenziale dalla quale si ottiene che la variazione di entropia nel tempo σ_{irr} è sempre maggiore di zero in accordo al secondo principio che risulterebbe così dimostrato a partire dalle leggi fisiche fondamentali.

A spegnere l'entusiasmo per questo risultato è apparsa però una critica corrosiva da parte di Josef Loschmidt, un notevole chimico fisico tedesco, il quale osservava che nella meccanica classica il tempo è reversibile poiché la soluzione delle equazioni del moto risultano simmetriche restando inalterate se si inverte il tempo. Viceversa nella termodinamica il tempo è asimmetrico poiché l'entropia può solo aumentare, per cui la trattazione di Boltzmann non può essere corretta. In altri termini se potessimo osservare la ripresa cinematografica di un evento che si svolge su scala molecolare risulterebbe impossibile stabilire quale sia la direzione del moto a differenza di quanto si verifica per un evento macroscopico.

Un approfondimento ha evidenziato che la ragione del successo di Boltzmann deriva dall'aver introdotto un'ipotesi , detta del caos molecolare, in base alla quale si assume che dopo una collisione le molecole si muovono a caso senza conservare traccia, o ricordo, degli eventi precedenti, come viene contemplato dalla meccanica newtoniana. In realtà l'approccio di Boltzmann risulta particolarmente efficace per descrivere l'evoluzione dei gas non uniformi, perché soggetti a gradienti di temperatura, pressione e concentrazione dei componenti nel caso di miscele. Tanto che attualmente viene applicato con una certa confidenza per la soluzione di problemi tecnici concernenti il flusso dei fluidi, la diffusione di componenti diversi in

dettagli dei processi in esame. Ad esempio la probabilità che nella gettata di una moneta esca una o l'altra delle due facce dipende dalla nostra incapacità di calcolare con precisione mediante la meccanica newtoniana la traiettoria della moneta sino alla sua caduta. E ciò per assenza di informazioni sui dati iniziali della gettata e sulle condizioni ambientali.

La situazione è però completamente diversa nella meccanica quantistica, che sta alla base dei moti molecolari, poiché la probabilità degli eventi ad essa associati deriva da una genuina incertezza su come opera il mondo. Pertanto il suo impiego non può essere rimosso acquisendo maggiori informazioni sui fenomeni sottostanti. Questa consapevolezza permette di fare luce sull'aspetto più intrigante sulla termodinamica che esprime attraverso il secondo principio una dichiarazione di impotenza, quella di trasformare il calore in lavoro meccanico senza saperne, dare una spiegazione. La sua saldatura con la meccanica quantistica sembra colmare questa lacuna perché include l'enigmatico principio di indeterminazione in accordo al quale la posizione e la velocità di una particella non possono essere misurate simultaneamente con accuratezza, sancendo così la presenza di una incertezza ineluttabile nello studio dei fenomeni microscopici[7]. In questo quadro è interessante osservare che recentemente è stato dimostrato che la sua violazione implica anche la violazione del secondo principio della termodinamica[8]. Ne consegue allora che l'impotenza della termodinamica sarebbe una conseguenza dell'incertezza dei fenomeni microscopici.

Tutto chiaro allora? Sì,... ma forse no, visto che Feynman, il genio, ha dichiarato che nessuno è mai riuscito a capire la meccanica quantistica.

Boltzmann durante le discussioni sulla sua equazione riconobbe l'importanza

di una adeguata conoscenza delle condizioni iniziali dei processi cui la si vuole applicare. Aggiungendo quindi che poiché il processo evolutivo del nostro mondo è iniziato in qualche modo, fosse giustificato scegliere una condizione iniziale con bassa entropia. A suo giudizio questo era l'unico modo per capire la validità del secondo principio. Ed aggiungeva, con una nota di sapore antropico, che l'esistenza della vita conferma che la nostra parte nell'Universo deve essere cominciata con un basso valore dell'entropia che attribuiva ad una enorme fluttuazione termica.

Successivamente gli astrofisici, primo fra tutti Roger Penrose[9], si sono appropriati di questa idea combinandola con la teoria del big-bang in corrispondenza del quale la materia era distribuita in modo uniforme, quindi ordinato con un valore relativamente basso dell'entropia. Pur trattandosi di una visione speculativa non possiamo sottrarci al suo fascino perché include in un evento di respiro cosmico lo sviluppo dei processi terrestri, della nostra società e delle nostre azioni quotidiane.

In conclusione il concetto di entropia continua ad occupare una posizione di primo piano nella filosofia, nella scienza e nella tecnologia. Ci insegna che i processi naturali sono irreversibili e che il tempo ha una direzione. La nozione di entropia nata dai vapori delle macchine termiche ha decollato rapidamente verso linee astratte quale la misura del disordine, per ricuperare concretezza nel conferire un senso fisico all'elusivo concetto di informazione. Infine saldandosi con la meccanica quantistica lascia presagire un inaspettato e innovativo approccio all'esplorazione del mondo al quale apparteniamo.

APPENDICE B

Unità di misura – Sistema Internazionale (SI)

Unità fondamentali

Lunghezza metro, m

Massa kilogrammo, kg

Tempo secondo, s

Temperatura kelvin, K

Quantità di materia mole, mol

Le masse, o pesi, atomici e molecolari relativi M sono riferiti alla dodicesima parte della massa dell'isotropo del carbonio ^{12}C, uguale a $1{,}66059 \cdot 10^{-27}$kg. La massa di una mole è quella di un insieme di unità (atomi o molecole) pari al numero di Avogadro N_A.

Unità derivate di interesse energetico

Forza = massa.accelerazione=kg.m.s^{-2}	newton N
Energia = forza.spostamento=newton.m	joule J
Potenza = energia/tempo =J/s	watt W
Pressione = forza/superficie = N/m^2	pascal Pa

Pressione = atmosfere (atm),

unità pratica non SI=101325 Pa

Litro(L) = 10^{-3} m^3

Barile di petrolio (bbl) = 159,99 L

Multipli

Kilo k	10^3
Mega M	10^6
Giga G	10^9
Tera T	10^{12}
Exa E	10^{18}
Zeta Z	10^{21}

Consumi conversioni energetiche

Calorie (cal) = 4,187 J

Kilowatt.ora = KWh = 3600 J

Cavallo vapore (hp) = 745,7 W

BTU (British Thermal Unit) = 1055,056 J

Elettrovolt, eV = $1{,}66027 \cdot 10^{-19}$J

Tonnellate di carbone equivalenti (tce) = 29,3 GJ

Tonnellate di petrolio equivalenti (toe) = 41,9 GJ

Contenuto energetico di alcuni combustibili (MJ/kg)

Idrogeno 142,1	120,1
Metano 55,5	50,0
Benzina 43,6-47,3	41,7-44,1
Gas naturale (MJ/m^3) 32,5-39,5	29,3-35,7
Etanolo 30,6	27,7
Coke 28,5	27,5
Carbone tipico 22,0-24,0	19,0-21,0
Legno secco 15,0-16,5	10,0-14,5

I primi dati forniscono i valori superiori corrispondenti all'acqua liquida, gli altri quelli inferiori con acqua gassosa.

Costanti fisiche fondamentali

Numero di Avogadro	$N_A = 6{,}022 \cdot 10^{-11}$ molecole/mo
Costante di Boltzmann	$k_B = 1{,}381 \cdot 10^{-23}$ J/K
Costante dei gas = $N_A \cdot k_B$	$R = 8{,}314$ J/mol K = 0,082 L atm/K mol
Velocità della luce	$c = 299\ 792\ 458$ m/s
Costante di Planck	$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js
Carica dell'elettrone	$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$C
Massa di un protone	$m_p = 1{,}673 \cdot 10^{-27}$k
Massa di un elettrone	$m_e = 9{,}110 \cdot 10^{-31}$kg

Simboli impiegati

A, numero totale di nucleoni nel nucleo A

E, energia

F, energia libera

J_k, flusso della grandezza X

m, massa

M, mole

P, pressione

q, flusso di calore

Q, quantità di calore

S, entropia

T, temperatura assoluta

U, energia interna

v, velocità

V, volume

W, lavoro

w, flusso di lavoro

ε, energia di uno stato quantico

η , rendimento di una macchina

ν, frequenza

σ, entropia prodotta per unità di tempo

ΔX, incremento della grandezza X

NOTE BIBLIOGRAFICHE

Capitolo 1

1. Donella H. Meadows, et al., *Limit to growth*, New American Library, 1977.
2. Richard Feynman, Robert Leigthon, Matthew Sand, *The Feynman lectures on Physics,* Addison Wesley, 1964.
3. Freeman Dyson, *From Eros to Gaia, Pantheon Books*, New York, 1992.

Capitolo 2

1. Sadi Carnot, *La potenza motrice del fuoco*, CUEN, 1996.
2. Richard Feynman, Robert Leigthon, Matthew Sand, *The Feynman lectures on Physics,* Addison Wesley, 1964.
3. Kerson Huang, *Fundamental Forces of Nature*, World Scientific, 2007.
4. Sergio Carrà, *Termodinamica*, Bollati Boringhieri,1990.
5. Sergio Carrà, *Struttura e stabilità*, Mondadori, 1978.
6. Muriel Rukeyser, *Willard Gibbs*, OX BOW Press, 1942.
7. Carroll Sean, *Dall'eternità a qui*, Adelphi, 2012.
8. Peter W. Atkins, *The Second Law*, Scientific American Library, 1984.
9. Freeman Dyson, *From Eros to Gaia, Pantheon Books*, New York, 1992.

Capitolo 3

1. Sergio Carrà, *Combustione omogenea ed eterogenea*, Enciclopedia degli Idrocarburi, Treccani-ENI, vol.V, pag. 413, 2008.
2. Sergio Carrà, *Sulle orme di Carnot*, FEM, 2011.
3. Richard Tolman and Paul C. Fine, *On the Irreversibile Production of Entropy*, Rev. Modern Physics, **20**, pag.51, 1948.
4. Harvey S. Leff, Andrew F.Rex, *Maxwell Demon*, Adam Hilger, Bristol, 1990.
5. James Gleick, *The information*, Fourth Estate, London.

Capitolo 4

1. Richard Feynman, Robert Leigthon, Matthew Sand, *The Feynman lectures on Physics,* Addison Wesley, 1064.
2. Robin Arianrhod, *Einsten's Heroes*, Icon Books, 2003.
3. Leon M. Lederman, Christopher T.Hill, *Quantum Physics for Poets*, Prometheus Books, 2011.
4. Franco Bassani, Umberto M. Grassano, *Fisica dello stato solido*,

Bollati Boringhieri, 2000.
5. Tom Markvart, *Solar cell as heat engine*, Physical Status Solid, **205**, **12**, 2572, 2008.
6. Oliver Merton, *Eating the Sun*, Fourth Estate, London, 2007.
7. Jim Barber, *Engine of life and big-bang of evolution: a personal perspective*, Photosynthesis Research, **80**,137, 2004.
8. Jerome Lavergne and Pierre Joliot, *Thermodynamics of The Excited States of Photosynthesis*, Biophysics Textbook on line, Biophysical Society, 2001.

Capitolo 5

1. Carl H. Hamann, Andrei Hamnett, Wolf Vielstich, *Electrochemistry*, John Wiley et Sons -VCH,1998.
2. Maria Navarra, Bruno Scrosati, *Celle a combustibile*, Scienza e Tecnica, vol.V, pag.101, Istituto Treccani, 2008.
3. Bruce Dunn et al., *Electrical Storage for the Grid: A Battery of Choice*, Science, **334**, 928, 2011.
4. Terrel L. Hill, *Free Energy Transduction and Biochemical Cycle Kinetics*, Dover Publications, 1989.
5. Reginald H.Garrett, Charles M.Grisham, *Biochemistry*, Books/Cole, Boston, 2008.

Capitolo 6

1. Sergio Carrà, *Le fonti di energia*, Il Mulino, 2008.
2. Richar A.Kerr, *Do We Have the Energy for the Next Transitions?*, Science, **329**, 780, 2010.
3. Enciclopedia degli Idrocarburi, Treccani-ENI, vol.II, *Raffinazione e petrolchimica*, Treccani,2008.
4. Enciclopedia degli Idrocarburi, vol. I, *Esplorazione, produzione e trasporto*, Treccani, 2008.
5. Maurizo Masi, Sergio Carrà, *Le energie rinnovabili*, rif.(1), pag.137.
6. Vaclav Smil, *Energy in Nature and Society*, MIT Press, 2008.
7. *Basic Research Needs for Solar Energy Utilisation*, Report of the Basic Energy Science Workshop, April 2001.
8. *Concentrating Solar Power: its Potential Contribution to a Sustainable Energy Future*, EASAC, Policy Report 16, 2011.
9. William Shockley, Hans J. Queisser, *Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells*, J. of Applied Physics, **32**, 510, 1961.
10. Harry A. Atwater, Albert Polman, *Plasmonic for Improved Photovoltaic Devices,* Nature Materials, **9**, march 2010, pag.205.
11. Vaclav Smil, *Global Energy: The Latest Infatuation*, American Scientist, **99**, pag.212, 2011.
12. Enrico Persico, *Gli atomi e la loro energia*, Zanichelli, 1959.
13. The Economist, *Nuclear Energy. The Dream that Failed*, march 10th-16th, 2012.

14. Andreas Schäfer, Henry D. Jacoby, John B. Heywood and Ian A.Waitz, *The Other Climate Threat: Transportation*, American Scientist, November-December 2009, pag. 476.
15. Nick Lane, *Oxygen*, Oxford University Press, 202.
16. Robert A. Berner, *Biogeochemical cycles of carbon and sulfur and their effects on atmospheric oxygen over Phanerozoic time*, Paleogeography Paleoclimatology, Paleoecology, **75**, pag.97, 1988.
17. Robert A.Berner, "*The Phanerozoic Carbon Cycle: CO_2 and O_2*" Oxford University Press, 2004.

Capitolo 7

1. Robert Stick, Spencer Williams, *Carbohydrates*, Elsevier, 2009.
2. David Beerling, *The Emerald Planet*, Oxford University Press, 2007.
3. David A.Walker, *Energy, Plants and Man,* Oxygraphics, Brighton, 1993.
4. Caye Drapcho, John Nghiem, Terry Walker, *Biofuels Engineering*, Mc Graw Hill, 2008.
5. Sergio Carrà, *Quo Vadis "Chimica"?,* La Chimica e l'Industria, pag.78, Luglio-Agosto 2011.
6. Robert H.Carlson, *Biology is Technology*, Harvard University Press, 2010.
7. Daniel G. Gibson, et al., *Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthetized Genome,* Science, **329**, pag.52, 2010.
8. Jay D. Keasling, *Manufacturing Molecules through Metabolic Engineering,* Science, April, 2011.
9. George Church, Ed Regis, *Regenesis*, Basic Book, 2012
10. Sergio Carrà, *La formazione delle strutture*, Bollati Boringhieri, 1989.
11. Nicholas J. Gotelli, *A Primer of Ecology*, Sinauer Associates,2011.
12. Weston A. Hermann, *Quantifying Global Energy Resources*, Energy, 2005.

Capitolo 8

1. Vaclav Smil, *Energy at the Crossroad: Global Perspectives and Uncertainities,* Cambridge Mass., MIT press, 2005
2. Masaki Satoh, *Atmospheric Circulation Dynamics and Circulation Models*, Springer-Verlag, 2004.
3. Stephen W. Pacala and Robert Socolow, *Stabilization Wedges: Solving the Climate Problem for the Next 50 Years with Current Technologies,* Science", **305**, pag. 968, 2007.
4. James H. Williams et al., *The Technology Path to Deep Greenhouse Gas Emissions Cuts by 2050*, Science, **335**,53, 2012.
5. Marten Scheffer, *Critical Transitions in Nature and Society,* Princeton University Press, 2009.
6. Andreas Schäfer, Henry D. Jacoby, John B. Heywood and Ian A.Waitz, *The Other Climate Threat: Transportation*, American Scientist, **97**, 476, 2009.

7. Dan E. Robertson et al., *A New Dawn for Industrial Photosynthesis*, Photosynth. Res. **107**, 269, 2011.
8. Sergio Carrà, *Sviluppo e necessità, un modesto esercizio di futurologia*, goWare,2012,ISBN 8897324282,9788897324287
9. James Gleick, *The Information*, Fourth Estate, London, 2011.
10. Cesar Hidalgo and Ricardo Hausmann, *The Building Blocks of Economic Complexity,* PNAS, 106, p.10570, 2009
11. Eric J. Chiasson, *Cosmic evolution*, Harvard University Press, (2001).
12. Eric J. Chaisson, *Energy Rate Density as a Complexity Metric and Evolutionary Driver*, Complexity, **16,** n.3, pag.27, 2010.
13. Paul R. Ehrlich, *The population bomb,* The Buccaneer Books,1968.
14. Crutzen, Geology of mankind, Nature, **415**, January, 2002.
15. Lawrence Weinstein, John Adam, *Guesstimation*, Princeton University Press, 2005.
16. Ray Kurzweil, *La singolarità è vicina*, Apogeo, 2008.
17. Luigi Luca Cavalli Sforza, *La specie prepotente,* San Raffaele, 2010.
18. Nick Lane, *Oxygen*, Oxford University Press, 2002.
19. Kevin Kelly, *Quello che vuole la tecnologia*, Codice, Torino, 2011.
20. Steven Pinker, *Better Angels of Our Nature: Why Violence has Declined,* Viking, 2011.
21. John Maynard Keynes, *Possibilità economiche per i nostri nipoti*, Adelphi, 2009.
22. Carlo Cipolla, *Allegro ma non troppo*, Il Mulino,2008.

Capitolo 9

1. Albert Einstein, *Il mondo come io lo vedo*, Newton Compton, 2012.
2. Matt Ridley, *The Rational Optimist*, Harper Collins, 2010.

Appendice A

1. Guy Deutscher, *The Entropy Crisis*, World Scientific, 2008.
2. Sergio Carrà, *Termodinamica*, Bollati Boringhieri, 1990.
3. James Gleick, The Information, Fourth Estate, 2011.
4. Seth Lloyd, *Ultimate Physical Limits to Computation*, Nature, **406**, 1048, 2000.
5. Stuart Kauffman, *Reinventing the Sacred*, Perseus Book, 2008.
6. Carlo Cercignani, *Ludwig Boltzmann, The Man Who*
7. *Trusted Atoms*, Oxford, 2010.
8. Vlatko Vedral, *In from the cold,* New Scientist, 13 October 2012, pag. 33.
9. Esther Hänggi, Stephanie Wenher, *A Violation of the Uncertainty Principle Implies a Violation of the Second Law of Thermodynamics*, (Arxiv.Org/1107.6029).
10. Roger Penrose, The Road to Reality, Jonathan Cape, 2004.