



Energia: a lezione dalla Natura

di Nicola Pugno*, Roberto Saracco**

Neuroni e altri sistemi biologici ispireranno nuove soluzioni per migliorare l'**efficienza energetica** globale



La nostra società, a partire dalla rivoluzione industriale, si è basata sulla disponibilità di energia. Le macchine aumentano la capacità di produrre e questo, ovviamente, richiede energia. Per esempio, se un artigiano produceva una sedia in un giorno possiamo dire che utilizzava circa 1 kWh. Questa stima serve solo a dare un'idea e assume un consumo medio di una persona intorno ai 100 W ora e un'ipotesi di dieci ore di lavoro. Se ora utilizziamo una macchina per fare sedie e di sedie ne facciamo cento potremmo chiederci se consumeremo 100 kWh (parità di efficienza) oppure più (meno efficiente) o meno (più efficiente). In realtà, questo tipo di valutazione non è stata fino a oggi prioritaria, in quanto è più importante riuscire a produrre un mag-

gior numero di sedie che possano essere vendute e generare reddito, piuttosto che porsi il problema dell'efficienza energetica per sé.

L'esempio della sedia può essere esteso a qualunque tipo di produzione e, anche se spesso non ci facciamo caso, anche al mondo dei bit (b). Oggi le infrastrutture elettroniche, le cosiddette autostrade dell'informazione, hanno un ruolo tutt'altro che marginale nei consumi energetici. Un'azienda come Telecom Italia per far "funzionare" la rete, che ci permette di parlare e accedere o inviare bit, utilizza una quantità di energia rilevante, intorno ai 2 TWh anno: questo la pone al secondo posto in Italia per consumo energetico, dopo le ferrovie. E questo rappresenta solo una parte dell'utilizzo di energia per le telecomunicazioni. Infatti, si stima che l'utilizzo di energia da parte di tutti i clienti di Telecom Italia (telefonini, modem, WiFi, ecc.) sia equivalente a 4 TWh anno e in continua crescita.

A fasi alterne il problema dell'energia arriva sulle prime pagine dei giornali, probabilmente per la prima volta a metà anni 70 con la crisi medio-orientale che, diminuendo la disponibilità di greggio, evidenzia come la nostra società sia diventata dipendente dalla disponibilità di fonti energetiche e come il loro costo condizioni tutta l'economia. In anni più recenti è andata maturando la consapevolezza che l'energia utilizzata ha impatti non solo in termini di approvvigionamento ma anche in termini di effetti della trasformazione che porta a generare CO₂, con conseguenze sull'irradiazione di calore nello spazio e quindi con un riscaldamento del Pianeta. Si è quindi posto l'accento sul tipo di sorgente energetica da utilizzare (sia in termini di disponibilità sia in termini di processi di trasformazione per renderla utilizzabile) e questi sono ovviamente temi importanti. Tuttavia, e questo è un aspetto che solo oggi inizia a emergere in termini di consapevolezza, qualunque sia il tipo di approvvigionamento energetico, l'utilizzazione dell'energia comporta una sua trasformazione da una forma a un'altra (da elettrica a meccanica, da chimica a elettrica, ecc.) e in questa trasformazione viene sempre generata energia termica (in accordo alla seconda legge della termodinamica). Quindi, anche se disponessimo di una quantità illimitata di energia (raccolgendo tutta quella che arriva dal Sole e i suoi derivati, utilizzando la fusione nucleare, le maree, ecc.) avremmo comunque il problema che questo utilizzo porta a un aumento di calore (energia termica) con conseguenze pesanti sul Pianeta. In termini meno globali, se anche avessimo la capacità di alimentare il nostro telefonino con una batteria inesauribile, il portare all'interno del telefonino un chip quale quello che si trova in un MacPro consentirebbe sì di aumentare la banda a qualche Gb/s ma dopo qualche minuto di utilizzo ci troveremmo ad avere in mano un ferro rovente.

Il punto, quindi, è quello di trovare sistemi che consentano di sfruttare meglio l'energia, in altri termini di consumare meno (e/o di dissipare meglio il calore). L'efficienza energetica che abbiamo sostanzialmente trascurato in questi duecento anni deve quindi diventare il vero punto di attenzione per il futuro. Quanto è possibile essere efficienti? Per trovare una risposta possiamo guardare a chi, per miliardi di anni, ha perseguito questo obiettivo raggiungendo, attraverso sistemi ingegnosi, un'efficienza elevatissima: la Natura. In questo articolo, che vuole principalmente incuriosire e stimolare riflessioni, vedremo sia l'efficienza a livello microscopico sia quella a livello macroscopico, quindi di un intero sistema complesso, paragonando cellule e chip, animali e catene produttive, ecosistemi e aggregazioni urbane.

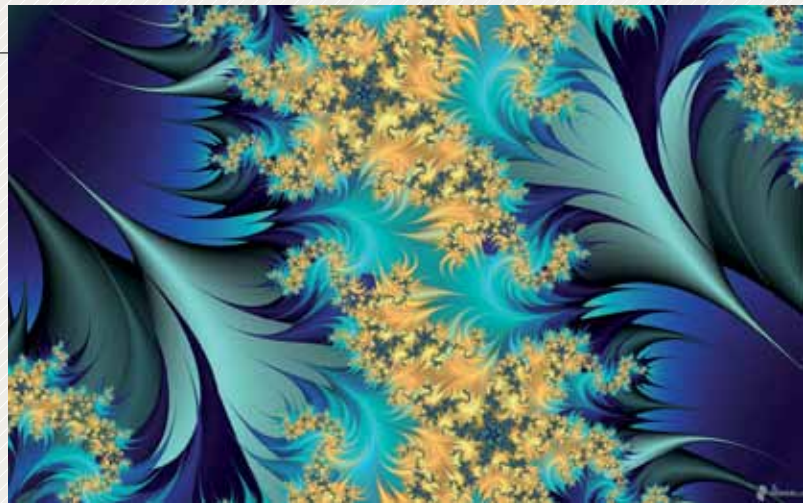
Questioni di spazio

"C'è un mucchio di spazio al fondo" è il titolo di una relazione fatta molti anni fa dal fisico statunitense premio Nobel Richard Feynman (1918-1988), dove si metteva in evidenza come l'abitudine a operare in una scala che spazia dai millimetri ai chilometri fornisce erroneamente l'impressione che quando si va verso il mondo micro, di spazio non ce ne sia affatto. Invece, ed è questo il punto di Feynman, guardando a scale che sono un milionesimo di

Frattali sostenibili

Un frattale è un oggetto autosomigliante a tutte le scale, come per esempio la geometria di un albero dove l'insieme (albero) è geometricamente simile alle sue parti (rami, e così via coi rametti, ecc., in teoria fino all'infinito). In Natura molti oggetti sono frattali, come la costa di un'isola: questa è così frastagliata che se si prova a misurare la sua lunghezza con righelli di dimensione via via minore questa tende a infinito.

La lunghezza di una linea frattale si misura infatti in m^D dove D è la sua dimensione del frattale; tutti gli altri valori di D portano a misure o infinite o nulle (come voler misurare l'area di una superficie o il numero di un insieme di punti con un righello). Una linea frattale, come una costa, ha dimensione $1 < D < 2$ cioè è un oggetto intermedio a una lunghezza e una superficie euclidei. Quindi non ha senso dire che una costa è lunga tot metri ma andrebbe detto che una costa



è lunga tot m^D , con D valore specifico della costa considerata e ottenibile imponendo che la misura non sia né nulla né infinita. Solitamente l'energia scala col volume del processo elevato a un esponente intermedio tra $2/3$ e 1 (vedere nostro commentary su nature materials, 2005); si potrebbe quindi dire che l'energia è proporzionale a un volume "frattale" intermedio a una superficie e a un volume euclidei; ciò capita anche per l'energia

metabolica negli organismi viventi e l'esponente inferiore a 1 porta a comprendere come un topo in proporzione mangi più di un elefante; questa legge di scala ha implicazioni nell'efficienza energetica al variare della scala e suggerisce la nascita di agglomerati di dimensione maggiore (elefanti/branchi) per incrementare l'efficienza energetica rispetto agli agglomerati più piccoli (topi/animali solitari) come osservato con la nascita delle città.

quella nostra naturale (che è il metro) scopriamo un nuovo mondo, quello nanoscopico. La nostra vita si svolge in un campo che si estende per un fattore 10^6 , dai millimetri ai chilometri; al di sotto di questo troviamo quello nanoscopico che si estende per un altro fattore 10^6 dai nanometri ai millimetri, e poi ancora al di sotto quello nucleare, dei quark, dei fotoni, dei quanti e che, arrivando fino alle reazioni chimiche tra molecole in una cellula, possiamo dire si estende anch'esso su un fattore di 10^6 , dai femtometri ai nanometri. A differenza del nostro spazio usuale, nel mondo atomico e subatomico coesistono le leggi della fisica classica (Newton) insieme a quelle della fisica quantistica (Dirac) e della fisica dei campi (Maxwell). Questi ultimi sono ovviamente parte anche del nostro mondo usuale, basti pensare ai telefonini che di campi elettromagnetici vivono, ma a livello atomico i campi costituiscono il terreno di gioco e sono sostanzialmente inseparabili dal resto.

La Natura ha imparato a sfruttare anche i fenomeni peculiari che avvengono a queste scale. Per esempio, la vista e la fotosintesi clorofilliana si basano sulla fisica quantistica (ovviamente questa è un'interpretazione a posteriori, la Natura semplicemente "funziona") e siamo noi che per spiegarne il come diciamo che i processi come la cattura del fotone a livello dei fotorecettori in una retina o in un cloroplasto sono basati sulla teoria quantistica. I campi costituiscono un elemento fondamentale della fisica per l'intero universo. Quando parliamo di un campo elettrico spesso sottintendiamo un flusso di elettroni, quale



quello che scorre nei fili di rame che ci portano a casa la corrente o quelli che all'interno di un chip consentono l'esecuzione di operazioni binarie. In realtà quello che succede nei fili elettrici, così come quello che accade in un chip, è l'insieme di due fenomeni: una propagazione di un campo elettromagnetico e un movimento di elettroni. Quest'ultimo è la conseguenza del campo elettromagnetico (in particolare elettrico), non la causa come intuitivamente potrebbe sembrare. Una carica elettrica stazionaria genera attorno a sé un campo elettrico e questo, a sua volta, provoca una forza di attrazione o repulsione su particelle ionizzate causandone lo spostamento. La variazione del campo elettrico si propaga - quando la carica è accelerata - alla velocità della luce (che peraltro è anch'essa un campo elettromagnetico, seppur particolare) mentre la propagazione equivalente degli elettroni è estremamente più lenta. Un elettrone in un filo di rame è come se si spostasse di pochi centimetri al secondo, anche se la corrente sembra essere un flusso istantaneo. Nello spostarsi l'elettrone opera una trasformazione di energia elettrica in energia termica (i fili si scaldano e così pure i chip): ebbene, questa energia termica non ha alcuna utilità dal punto di vista della propagazione ed elaborazione di un segnale. Se si riuscissero a utilizzare i campi senza scomodare gli elettroni per effettuare un'elaborazione (e trasmissione) del segnale potremmo risparmiare moltissima energia. Quanta ne dovremmo utilizzare? Circa mille volte di meno. Questo è quanto è stato dimostrato recentemente da ricercatori della University of California, Los Angeles (UCLA, <http://snipurl.com/28ypbyj>) che sono riusciti a effettuare elaborazioni di segnale attraverso chip basati su una nuova classe di materiali magnetici chiamati "multiferroici" (ulteriori progressi sono attesi dalla sostituzione del silicio con il grafene, materiale del futuro, su cui stiamo lavorando anche per l'accumulo energetico di idrogeno, grazie al megafinanziamento da parte dell'Unione Europea della prima Flagship). I materiali multiferroici hanno la proprietà di cambiare il loro stato in dipendenza dal campo elettromagnetico, che è generato dallo spin dell'elettrone, non dal suo movimento. Quello che hanno fatto i ricercatori alla UCLA è la realizzazione di uno "spin wave bus" che si sposta senza implicare lo spostamento di elettroni (così come nel mare un'onda viaggia senza spostare significativamente le molecole d'acqua nel senso di traslazione della stessa). La spintronica, questo nuovo settore della tecnologia, ci promet-

te quindi chip più veloci, più “densi” e quindi più performanti, e un enorme risparmio energetico.

Non siamo stati i primi a scoprire che attraverso la fisica quantistica si possono realizzare sistemi di segnalazione a bassissimo costo energetico. I nostri occhi - e quelli di tutti gli animali, compresi alcuni batteri - utilizzano questo sistema da centinaia di milioni di anni. La molecola di rodopsina è in grado di catturare un fotone attraverso un meccanismo che coinvolge lo spin e di cambiare la sua forma generando quindi un segnale che poi viene catturato, nel caso degli animali, dal cervello. Se un ingegnere avesse progettato la retina come un chip di oggi, in tecnologia CCD (“Charge Coupled Device” usata nelle macchine fotografiche digitali), avrebbe scoperto che la sua invenzione per funzionare generava calore, troppo, al punto da bruciare il nervo ottico in meno di un minuto! E non c'è ragione per non pensare che moltissime delle nostre tecnologie attuali mostrino così il fianco. Il cervello, almeno per quanto ne sappiamo oggi (entro i prossimi dieci anni la nostra conoscenza del cervello dovrebbe aumentare di parecchio grazie alla seconda Flagship finanziata dall'Unione Europea, The Human Brain, oltre che Connectomics, il progetto gemello americano), pare non utilizzi fenomeni quantistici (anche se alcuni scienziati hanno speculato al riguardo) ma è tuttavia in grado di ottenere un'efficienza energetica confrontabile.

Potenza cerebrale

La capacità elaborativa (termine questo da prendere con le molle quando si parla di cervello) dei 100 miliardi di neuroni e 100 mila miliardi di connessioni (dendriti e assoni), realizzata attraverso sistemi di trasmissione elettrica e condizionati da neuromodulatori chimici (per esempio, serotonina e dopamina) è stimata intorno a quella che oggi potrebbero fornire un centinaio di supercomputer Thiane-2. Questi ultimi avrebbero bisogno di circa 2 GW mentre il nostro cervello funziona con meno di 25 W, quindi consuma 100 milioni di volte di meno della nostra tecnologia relativamente più avanzata. Il trucco, qui, si basa su architetture particolari che fanno emergere i risultati dell'elaborazione non in termini di “uscita” ma in termini di “stato”. Inoltre, nel cervello vengono attivati (espressione che può generare confusione in quanto sembrerebbe che ci sia qualcuno che decide cosa attivare istante per istante, mentre non è così) solo quei neuroni, e quei pezzi di neurone (dendriti/assoni) necessari, riducendo quindi enormemente i consumi. I ricercatori hanno dimostrato, per esempio, come il cervello della mosca tenga normalmente spenti la maggioranza dei recettori degli occhi; nel momento in cui decide di spiccare il volo li attiva tutti e in contemporanea spegne i neuroni non coinvolti nel volo, di nuovo riducendo in maniera sostanziale i consumi. Non solo. È stato dimostrato che il nostro cervello quanto più è bravo a fare qualcosa tanto meno consuma. Per esempio, se si osservasse il cervello di uno degli autori di questo pezzo mentre cerca di mandare a canestro il pallone si vedrebbe un'enorme quantità di neuroni coinvolti. Viceversa, se si osservasse il cervello di un campione di basket si vedrebbe che solo pochissimi neuroni sono coinvolti (e il risultato è migliore). Il motivo è che attraverso l'apprendimento il cervello rafforza alcune connessioni e ne indebolisce altre con l'obiettivo di risparmiare energia.

Il risparmio energetico è di tale importanza nel cervello che abbiamo maturato la percezione del bello (e anche dell'amore così come di altre sensazioni piacevoli) proprio nella misura in cui queste sono il risultato di attività cerebrali a bassa energia. Questo spiega come mai le simmetrie sono generalmente considerate belle (sono più facili da elaborare, il cervello consuma meno) così come i volti che sono usuali per noi tendono a diventare belli, così come un cibo cui ci siamo abituati da bambini è considerato buono: il cervello ci premia in termini di sensazioni positive quando lo facciamo lavorare poco (o in modo molto efficiente) e quindi consumare meno.

L'evoluzione delle specie ha seguito in modo preciso la direzione del miglioramento

energetico sotto l'occhio attento della seconda legge della termodinamica (statistica). Chi è più bravo nell'ottimizzazione delle risorse energetiche prevale (nuova e aggiornata formulazione della teoria dell'evoluzione di Darwin). Gli esempi che si potrebbero portare sono ovviamente numerosissimi e i ricercatori da alcune decadi hanno iniziato a studiare i sistemi viventi per imparare da questi come essere efficienti, dalle foglie per la trasformazione di luce solare in energia chimica/elettrica, dalle lucciole per trasformare energia chimica in energia luminosa, e più recentemente dal cervello per elaborare l'informazione.

Dallo studio dei sistemi complessi stiamo iniziando a capire come possano emergere informazioni e ordine in assenza di un coordinamento centrale, dallo studio di come il cervello elabora le informazioni visive e sonore stiamo iniziando a capire quali sono gli elementi primari in grado di portare alla comprensione (con interessanti ricadute sulla capacità di minimizzare l'informazione trasportata). Il sistema di codifica "MPEG4" utilizza già questi meccanismi. L'immagine trasmessa sul televisore in HD richiederebbe intorno ai 16 Mb/s per essere in alta qualità, ma in genere sono sufficienti 4 Mb/s andando a codificare solo le informazioni primarie. Provate a guardare una partita di calcio in HD. L'immagine sembra perfetta nel suo insieme. Ora fate attenzione all'erba dello stadio. Sembra una moquette, la definizione è bassissima. Quello che viene trasmesso in alta definizione sono i calciatori. Quando la palla si ferma e quindi si possono trasmettere meno riquadri, anche l'erba diventa in alta definizione e questo è quanto basta per farla ricordare al cervello.

Nuove tecnologie di elettronica *embedded* (sensoristica), elaborazione massicciamente distribuita e utilizzo di rappresentazioni virtuali del mondo consentono sempre più di avvicinarsi ai meccanismi con cui opera la Natura e aumentare enormemente l'efficienza. Questo deve avvenire sfruttando sì i progressi tecnologici quali quelli citati (e molti altri) ma soprattutto cambiando le architetture a livello macroscopico e arrivando ad ambienti che, come in Natura, sono in realtà degli ecosistemi.

Dal micro al macro

L'evoluzione tecnologica avviene su varie direttrici anche se in genere se ne percepiscono solo alcune. Per esempio, nel caso dei chip per molto tempo l'attenzione è stata posta sul miglioramento delle prestazioni, la cosiddetta legge di Moore. In realtà vi è stata una parallela, ed equivalente, diminuzione dei consumi (legge di Koomey). Questa ha giocato un ruolo fondamentale nell'aumento della densità di transistor nel chip. I chip di oggi non potrebbero esistere se i transistor che contengono consumassero quanto quelli di 10 anni fa. Fonderebbero in pochi secondi.

Anche a livello di infrastrutture l'avvento delle fibre ottiche ha drasticamente abbattuto i consumi. Questo miglioramento è globale, vale per l'elettronica come per la costruzione di edifici in cui oggi abbiamo efficienze molto maggiori di una volta che consentono la costruzione di grattacieli auto-sostenibili (in cui le superfici catturano energia e l'architettura interna diminuisce i fabbisogni energetici, similmente ai termitai; curioso anche il fatto che pare che le api abbiano la capacità di accumulare l'energia solare). Le città stanno diventando "smart", e una delle metriche per valutare quanto una città lo sia è relativa alla sua efficienza energetica. Le città per funzionare hanno bisogno di infrastrutture (strade, ma anche reti idriche, di scarico, reti elettriche, processi di approvvigionamento, servizi di trasporto, ecc.). Al tempo stesso le città sono grandi officine che producono valore (e calore). È stato osservato, empiricamente, come la produzione di valore sia in relazione con la dimensione della città e come il rapporto sia nuovamente intorno a un esponente $2/3 < 3/4 < 1$. Anche in questo caso il motivo è da ricercarsi nella natura frattale delle infrastrutture (vedi box a pag. 87).

Internet non ha una natura necessariamente frattale (anche se spesso questa si manifesta) se non per le infrastrutture fisiche su cui si poggia; da un lato queste evolveranno

verso aggregati *mesh* (halo nets) in continua riconfigurazione, dall'altro le infrastrutture dei dati non hanno alcuna necessità di avere un'architettura frattale. La sfida, per i progettisti del futuro, sarà di creare strutture che abbiano una maggiore efficienza intrinseca. Prendiamo un esempio. Un veicolo in grado di muoversi in modo autonomo (come la Google car) interagisce con il contesto locale per muoversi e raggiungere il suo obiettivo (arrivare a destinazione). Se l'interazione avviene in un contesto globale, il veicolo può ottimizzare la sua strategia identificando il percorso più efficiente. Siamo ancora in una struttura frattale in quanto il percorso è un sottoinsieme di un sistema frattale. Tuttavia se immaginiamo che tutti i veicoli siano autonomi allora possiamo pensare che si possa arrivare a un'ottimizzazione globale che cambia in modo dinamico l'infrastruttura fisica, per esempio cambiando i versi di sensi unici per far fronte a traffico sbilanciato o utilizzando in modo asimmetrico una strada.

Abbondanza e inefficienza

Viviamo in un mondo che, grazie all'abbondanza energetica e all'invenzione di modi per sfruttarla, ha portato in una dimensione dell'abbondanza e dell'inefficienza. Pensiamo a quante macchine riusciamo a produrre (e vendere) e poi a quante di queste macchine in ogni istante facciano quello per cui sono state progettate: viaggiare. La percentuale è decisamente inferiore al 5% (facendo un'integrazione sulle 24 ore avremmo un 5% se tutti i veicoli "funzionassero" almeno per 1h 12' al giorno). Potremmo fare l'esempio dei telefoni, dei vestiti, dei libri, ecc. Lo spazio per migliorare l'efficienza è enorme (malgrado da spenti questi sistemi consumino poco o niente). Conquistare questo spazio sarà l'obiettivo delle prossime decadi anche se, in modo forse pessimistico, gli autori ritengono che gran parte dello sforzo nel medio termine sarà rivolto ancora all'aumento della produzione in quanto questo è alla base dei modelli economici di oggi. Peccato che nel medio lungo termine questi modelli non siano sostenibili. E prevenire sarebbe meglio che curare. Se tutti consumassimo quanto consumano negli Emirati Arabi occorrerebbero 6 pianeti come la Terra per soddisfare queste esigenze. Se il paragone fosse con gli USA servirebbero 4,5 Terre e se tutti sulla Terra consumassero quanto consumiamo noi in Italia avremmo bisogno di 2,5 Terre. Il problema è che, per diversi secoli ancora, di Terre disponibili ce ne sarà una sola. Un radicale ridimensionamento dei consumi che passi attraverso una maggiore efficienza energetica in senso sistemico non riduce il comfort delle persone ma richiede cambiamenti radicali (sei disposto ad abbandonare l'idea di una *tua* auto, per passare a quella di un mezzo di trasporto condiviso?). La Natura ha perseguito puntigliosamente il risparmio energetico e non si è fermata quando si è accorta che questo portava alla scomparsa dei dinosauri (e del 99% delle altre specie, se si guarda alle cinque grandi estinzioni che hanno attraversato i 4,4 miliardi della Terra).

Possiamo, dobbiamo imparare dalla Natura. Al tempo stesso possiamo fare meglio della Natura in quanto non abbiamo i vincoli che questa ha. Un esempio è l'introduzione di *nanorods* all'interno di cloroplasti (nanobionics) che portano a un aumento dell'efficienza di conversione della luce del 30%, un progresso che la Natura non può fare perché lavora all'interno delle cose per la loro evoluzione mentre noi possiamo lavorare anche all'esterno, quindi per scopi differenti dall'evoluzione, come la curiosità che ci ha portato sulla Luna. Siamo di fronte a enormi possibilità tecnologiche, ma le sfide maggiori sono sul versante della consapevolezza e della cultura. Creare una cultura di comprensione della complessità dell'energia e della responsabilità nel suo utilizzo è il primo fondamentale passo.

*Laboratory of Bio-inspired & Graphene Nanomechanics, Department of Civil, Environmental and Mechanical Engineering, University of Trento

**Direttore EIT ICT Labs Italy