

Riflessioni sul problema energetico: luci ed ombre del nucleare

Giorgio Turchetti

Dipartimento di Fisica Università di Bologna.

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sezione di Bologna

Per capire che cosa è l'energia proviamo a immaginare che essa venga a mancare: le conseguenze sarebbero drammatiche. Infatti la civiltà è iniziata quando la disponibilità di energia è cresciuta superando in modo significativo lo stretto fabbisogno alimentare. L'energia è la capacità di compiere lavoro e questa si manifesta in forme molto diverse. Al primo posto, con una quota pari al 82%, troviamo la energia chimica, che si utilizza, attraverso processi di combustione, per riscaldare, per azionare motori o per produrre energia elettrica. L'energia nucleare è quella contenuta nei minerali di uranio che viene trasformata in calore nei reattori per poi produrre energia elettrica. Le energie rinnovabili derivano direttamente o indirettamente dalla energia luminosa del sole. Il maggior contributo tra le rinnovabili è dato dalla energia idroelettrica e queste complessivamente contribuiscono, al pari del nucleare, per un 6%. Un terzo dell'energia primaria è utilizzata per il trasporto, un terzo per produrre energia elettrica, un quinto per le abitazioni. Per misurare l'energia si usano molte unità come Joule, caloria, Kilowattora. Scegliendo il Tep, ossia la tonnellata equivalente di petrolio, come unità di misura il consumo mondiale annuo ammonta a circa 10 miliardi di Tep e a fronte di una popolazione di 6 miliardi di persone il consumo annuo pro capite è di 1.5 Tep pari a 15 volte il fabbisogno alimentare. I consumi energetici sono geograficamente molto diversificati: espressi in Tep pro capite all'anno abbiamo 8 in USA e Canada, 4 in Europa, 3 in Italia, 1.3 Cina, 0.5 in India e si scende anche sotto 0.5 in talune regioni dell'Africa. Il costo dell'energia subisce forti variazioni legate alle leggi di mercato ed a particolari condizioni locali. Nella produzione di energia elettrica costo del KWh dipende da molti parametri: costo di impianto, costo del combustibile, costi di manutenzione, tasso di sconto, eventuali crediti di emissione CO₂, ore di funzionamento annue. A titolo puramente orientativo per il carbone ed il gas si va da 3 a 6 c€ per KWh, per il nucleare da 2 a 5 c€ per KWh, mentre per l'eolico il costo è più alto da 1.5 a 2 volte e per il fotovoltaico da 4 a 10 volte (media 40 c€). Il nucleare, pur con le criticità che presenta, risulta conveniente, mentre i rinnovabili richiedono ancora incentivi importanti. Una valutazione ancora più complessa è quella dei costi indiretti che la collettività paga per gli effetti collaterali negativi legati all'utilizzo delle varie fonti.

Fossili e cambiamenti climatici

Il passaggio dall'utilizzo esclusivo di fonti rinnovabili come le biomasse ai combustibili fossili, che avvenne all'inizio del XIX secolo, ha comportato la rottura di un equilibrio. Lo studio dei cambiamenti climatici mostra una correlazione stretta tra la temperatura media e la concentrazione di CO₂. Negli ultimi 10000 anni c'è stato un aumento graduale

che ha portato la concentrazione di CO₂ a 280 parti per milione all'inizio dell'era industriale. Da allora è iniziata una crescita anomala che si è ulteriormente accelerata nell'ultimo mezzo secolo portando il livello attuale a quasi 400 parti per milione. In questo brevissimo arco di tempo l'aumento della temperatura media su scala planetaria è stata prossima ad un grado. Se non si pongono in atto interventi capaci di cambiare l'andamento tendenziale gli scenari che si profilano per la fine del secolo sono allarmanti. A fronte di un probabile aumento della popolazione tra 10 e 15 miliardi di individui nella seconda del secolo sono attesi consumi energetici attorno ai 20 GTep, che potrebbero portare ad un raddoppio della concentrazione di CO₂, se i fossili dovessero rappresentare la quota largamente maggioritaria del paniere. Modelli climatici prevedono aumenti di temperatura che vanno da 2 a 5 gradi, capaci di provocare sconvolgimenti in vaste aree del pianeta e di favorire anche lo sviluppo di eventi meteorologici estremi. E' chiaro che l'unica strategia possibile è quella di ridurre drasticamente la emissione di gas serra come previsto dal protocollo di Kyoto. Il solo risparmio energetico non è sufficiente, mentre l'aumento delle fonti rinnovabili è un processo lungo e costoso. Il nucleare tradizionale presenta problemi di accettabilità sociale e la produzione di petrolio avrà un picco entro 25 anni circa secondo la teoria di Hubbert. Come conseguenza potrebbe aumentare il consumo di carbone e gas i cui picchi si situano tra 160 e 60 anni rispettivamente. Gravi conseguenze sul clima potrebbero essere evitate solo da scenari alternativi come un significativo aumento delle energie rinnovabili ed un maggiore ricorso alla energia nucleare.

Le fonti rinnovabili

L'idroelettrico ha rappresentato in Italia per molti decenni fino agli anni 50 la principale sorgente di energia elettrica, ma oggi si attesta attorno ad un 15% confrontabile con l'energia elettronucleare importata. La geotermia è presente da oltre un secolo ma contribuisce solo per un punto percentuale. Fonti rinnovabili come l'eolico ed il fotovoltaico si sono sviluppate in tempi recenti ricevendo sovvenzioni importanti. I pannelli fotovoltaici convertono direttamente in energia elettrica l'energia luminosa del sole, mentre le pale eoliche sfruttano la energia dei venti, causati dal riscaldamento solare della atmosfera. Il problema principale della energia solare è la sua diluizione. Infatti la radiazione solare suolo alle nostre latitudini raggiunge un valore massimo di circa 1 KW per metro quadro, e può essere convertita da un pannello di un metro quadro in 100-150 W di potenza elettrica. Un parametro significativo, anche per il confronto con altre forme di energia, è la potenza media annua oppure il capacity factor, che è il rapporto tra la potenza media annua e la potenza di picco. Il fattore di riduzione di circa il 15% dovuto è all'alternanza di giorno e notte e delle stagioni oltre che da molteplici fattori meteorologici che riducono la intensità della radiazione solare al suolo. Ne segue che la potenza media di un pannello, circa 15-20 W/m², è sufficiente per il fabbisogno di una famiglia che installi pannelli sul tetto di casa, ma la produzione massiccia di energia è più problematica. Una centrale termica da 1 GW di potenza occupa pochi ettari, mentre una centrale fotovoltaica con la stessa potenza media occuperebbe una superficie di oltre 100 Km². Il costo dei pannelli rende il Kwh fotovoltaico assai più caro rispetto a quello prodotto in una centrale a gas. Per l'eolico la situazione è più favorevole, perché i costi di impianto sono più bassi e quindi il costo del KWh è vicino a quello ottenuto da centrali a gas, ma limiti ad un massiccio utilizzo di questa fonte

vengono dalla disponibilità di siti in cui il vento è costante e spira ad una velocità sufficientemente elevata. Le pale eoliche installate su torri alte un centinaio di metri hanno una potenza di picco di 1-2 MW ed una potenza media che varia tra il 20% e il 40%. Con una efficienza del 20%, tipica del nostro territorio, per ottenere una potenza media di 1 GW bisognerebbe installare una potenza di picco di 5 GW ossia 5000 torri da 1 MW impegnando un'area di ben oltre 100 Km² con rilevante impatto ambientale e paesaggistico. Una prospettiva interessante con impatto certamente più basso è costituito dalle torri eoliche off shore (in mare aperto).

La fonte nucleare

Questa forma di energia deriva dalle forze di legame che tengono insieme il nucleo. Un nucleo pesante come l'uranio decade in due nuclei più leggeri e la differenza di massa si trasforma in energia secondo la celebre relazione di Einstein $E=mc^2$. L'energia del legame nucleare è molto più elevata di quella del legame chimico ed il rapporto è di 1 a un milione, confrontabile con il rapporto tra dimensioni del nucleo e dell'atomo. Il fatto che l'energia nucleare sia molto concentrata presenta il vantaggio di poterne ottenere grandi quantità da volumi molto piccoli di combustibile, ma presenta anche il problema di interromperne la produzione. I processi di fissione si auto sostengono quando si raggiunge un equilibrio tra il numero di neutroni presenti che vengono catturati, innescando reazioni di fissione, ed i neutroni emessi dalla fissione dei nuclei. Il controllo si realizza utilizzando metalli come il cadmio con elevata capacità di di catturare neutroni. I problemi che si presentano nell'esercizio di un reattore sono la rimozione della energia prodotta sotto forma di calore, e il passaggio dalla fase critica a quella sottocritica per il suo spegnimento. L'uranio si presenta in natura in due stati isotopici U^{238} e U^{235} fissionabile e presente in una frazione inferiore ad 1%. La cattura di un neutrone da parte di un nucleo di U^{235} è efficiente se il neutrone è lento e per questo i neutroni prodotti dal processo di fissione vanno rallentati (da 2 MeV a 0.025 MeV) attraverso un opportuno moderatore. Se questo non assorbe i neutroni il combustibile può essere uranio naturale, se invece assorbe neutroni, come accade per l'acqua, l'uranio va arricchito nella componente fissionabile. Accanto a questi reattori, detti termici, sono stati progettati e costruiti in pochissimi esemplari i reattori veloci in cui il combustibile è una miscela di uranio e plutonio, che catturando un neutrone veloce decade emettendo più neutroni di quelli necessari per mantenere la reazione a catena. I neutroni in eccesso sono catturati dall'uranio naturale che si trasforma a suo volta in plutonio. Così si produce più combustibile di quanto se ne consuma ed il processo continua teoricamente fino ad esaurimento di tutto l'uranio. I due tipi di reattore chiuderebbero così il ciclo del combustibile consentendo di estrarre tutto il potenziale energetico dell'uranio è 3 milioni di volte quello di un chilogrammo di carbone (7.2×10^{13} joule rispetto a 2.4×10^7 joule). Nei reattori termici solo una piccola frazione del combustibile viene utilizzata mentre completando il ciclo con i reattori veloci la resa energetica verrebbe aumentata di un fattore 60 poiché tutto l'uranio verrebbe consumato. Per alimentare una centrale a carbone da 1 GW occorrono 2.5 milioni di tonnellate di carbone, per una centrale nucleare bastano 20 o 30 di tonnellate di uranio. Chiudendo il ciclo, il combustibile necessario sarebbe circa una tonnellata e le riserve di uranio sarebbero sufficienti per molti secoli. Sicurezza, scorie e proliferazione sono i parametri critici cui le nuove generazioni di reattori debbono dare una risposta. Il rischio per la popolazione è praticamente nullo in

condizioni normali anche in prossimità della centrale, contrariamente alle centrali termiche che immettono in atmosfera gas e polveri sottili nocive per la salute. Il problema si presenta nel caso di incidente grave con rilascio di sostanze radioattive, che interessano non solo la prossimità del sito ma anche regioni più lontane se trasportate dai venti. Scongiorare eventi come la fusione del nocciolo ed il rilascio di materiale radioattivo al di fuori delle strutture di contenimento è l'obiettivo di ogni progetto, che deve tenere conto anche degli eventi più estremi ed improbabili. Il problema delle scorie è meno critico, perché si tratta di volumi ridotti, e sarebbe praticamente risolto nel caso in cui il ciclo del combustibile venisse chiuso. Le scorie ad alta attività sono costituite dagli elementi di combustibile esausto, ma dopo il riprocessamento che recupera l'uranio e il plutonio, utilizzabili per preparare nuovo combustibile, restano come scorie solo gli attinidi, che complessivamente non superano le due tonnellate all'anno. L'ultimo rischio importante associato con le scorie nucleari è quello di proliferazione, cioè la possibilità che elementi come il plutonio vengano utilizzati per produrre armi nucleari o più probabilmente ordigni capaci di spargere materiale radioattivo in seguito ad una esplosione convenzionale (bombe sporche). Questo implica che la gestione di una centrale nucleare, lo stoccaggio il trasporto ed il processamento delle scorie debbano essere fatti sotto stretta sorveglianza di una autorità di controllo. Attualmente sono installati 439 reattori e la potenza erogata è cresciuta del 40% negli ultimi 20 anni, anche se poche nuove installazioni sono state realizzate, perché la efficienza è aumentata. Le riserve di uranio sono circa 5 milioni di tonnellate che ai ritmi di consumo attuali danno una autonomia di 70 anni, ma sono presenti altre riserve (circa il doppio) estraibili a costi un poco più alti. I reattori veloci consentirebbero di moltiplicare per 60 il periodo di utilizzo, mentre le riserve di uranio nell'acqua di mare sono quasi illimitate.

Fusione nucleare

I processi di fusione sono quelli che avvengono nel sole e nelle stelle e che sono stati realizzati sulla terra con le bombe termonucleari. Due nuclei leggeri come gli isotopi dell'idrogeno quali deuterio e trizio si fondono, se la temperatura è sufficiente a vincere la repulsione coulombiana dei nuclei, e danno origine ad un nucleo di elio ed un neutrone veloce (14 MeV). La reazione non produce direttamente scorie radioattive e in un eventuale reattore soltanto le strutture attivate dai neutroni produrranno scorie a bassa attività. Due sono le strade seguite per ottenere la fusione controllata: il confinamento con campi magnetici e la compressione di microcapsule mediante fasci laser. Quando la temperatura supera un centinaio di milioni di gradi pari a 10 KeV, le reazioni di fusione che avvengono tra due isotopi dell'idrogeno, il deuterio ed il trizio, diventano così frequenti da consentire al processo di autosostenersi. Un esperimento condotto pochi anni fa presso i laboratori europei JET in Inghilterra ha generato in una scarica una energia da fusione pari a circa la metà di quella che era stata necessaria a produrla. Mantenere le scariche per tempi lunghi è impresa difficile per le instabilità che vengono a crearsi e che possono essere attenuate aumentando le dimensioni degli impianti. Le dimensioni del dispositivo previsto dal progetto ITER, che si sta realizzando in Francia, sono 2 e 6 metri come raggio interno ed esterno del toroide (ciambella) di plasma. Un percorso alternativo consiste nel comprimere delle microcapsule di deuterio e trizio a pressioni elevatissime in modo che possano raggiungere le temperature di

fusione. La compressione avviene attraverso impulsi laser che illuminano la capsula comprimendola..

Il progetto NIF negli USA dispone già di una batteria di 180 laser che hanno la intensità sufficiente (1.8 MJ) per produrre la fusione ed i primi esperimenti sono in corso di realizzazione. Molte altre varianti sono previste tra cui la illuminazione indiretta della capsula tramite un flash di raggi X prodotti dalla interazione dei fascio laser con un cilindretto di materiale ad alto numero atomico oppure l'invio di un fascio di elettroni che penetrando nel nucleo crea un punto caldo, dove si innesca la deflagrazione nucleare. Una volta provata la fattibilità fisica della fusione lo sviluppo della tecnologia potrebbe richiedere tempi lunghi. La fusione non può dar luogo a reazioni incontrollate, perché venendo a mancare il confinamento con l'interruzione della potenza elettrica che alimenta i magneti o i laser, le reazioni di fusione cessano istantaneamente.

Scenari futuri

Prima dell'incidente di Fukushima era stato previsto un graduale rientro dell'Italia nella produzione di energia elettronucleare. Uno scenario per il 2030 prevedeva un 27% di rinnovabili un 25 % di nucleare ed il restante 48% di fossili. Lo scenario alternativo che prevede costi più elevati ed è molto difficile da raggiungere prevede invece un 38% di rinnovabili ed un 62% di fossili. Resta più probabile lo scenario di riferimento in cui i rinnovabili sono al 27% ed i fossili al 73%. Difficilmente si tornerà al primo scenario, e quindi il peso degli incentivi, che graveranno sulla bolletta elettrica fino al 2020 sarà pesante, circa 60 miliardi di Euro per avere 8 GW di picco dal fotovoltaico.

La potenza media corrispondente è di circa 1,6 GW e questo significa che si produrrà l'energia equivalente a quella di una centrale nucleare come l'EPR di Flamanville ad un costo di circa 10 volte più alto. Nonostante le cautele, che l'incidente di Fukushima suggerisce, la rinuncia alla fonte nucleare avrà conseguenze economiche significative sul nostro paese. Una adeguata formazione e una corretta informazione sono le condizioni perché scelte di politica energetica corrette possano essere effettuate, capite e condivise. Sui media, il tema viene spesso affrontato ma in modo parziale e spesso distorto poiché si danno prevalentemente notizie che suscitino emozioni come avviene nel caso di incidenti. Anche il ricorso allo strumento referendario, senza una base corretta di informazione, ha una valenza prevalentemente demagogica.

Lo scenario che si delinea è complesso e richiede scelte che consentano nei prossimi decenni un graduale abbandono dell'utilizzo dei combustibili fossili evitando gravi crisi economiche e riducendo i rischi ambientali. Il primo intervento riguarda il risparmio energetico, che comprende il miglioramento della efficienza nella produzione ed utilizzo dell'energia, ed una riduzione dei consumi non strettamente necessari. Nei trasporti con la diffusione di auto ibride ed elettriche consentirà un risparmio, ed un parziale utilizzo di fonti non fossili, mentre nella edilizia l'uso di materiali innovativi, della energia solare e di pompe di calore può portare verso l'obiettivo di autonomia energetica.

La direttiva europea è quella di realizzare entro il 2020 una riduzione del 20% delle emissioni di CO₂, un risparmio del 20% tramite miglioramento della efficienza e la produzione di un 20% di energia tramite le fonti rinnovabili. Portare la quota dei fossili sotto il 50% senza un contributo che venga dal nucleare, che è ben presente in Europa, dove contribuisce per 30% alla produzione di energia elettrica, è del tutto irrealistico. Oltre

al risparmio saranno necessari cambiamenti profondi nel sistema energetico, che possiede una grande inerzia ed è auspicabile che le scelte spettanti alla politica avvengano sulla base di argomenti con un solido ancoraggio tecnico-scientifico piuttosto che su pressione di gruppi che difendono interessi particolari. Diversi sono i fattori che giustificano l'urgenza di scelte decisive: il picco di Hubbert del petrolio è previsto tra una trentina d'anni e vistosi cambiamenti climatici causati dall'aumento di CO₂ potrebbero avvenire entro la metà del secolo. Nei nuovi scenari le fonti rinnovabili avranno un ruolo importante soprattutto se i costi di impianto, ora elevati, diminuiranno. E' comunque inevitabile l'occupazione di una importante frazione del territorio richiesta da queste fonti. Inoltre la loro forte variabilità implica che possono essere utilizzate solo per integrare una rete basata su centrali di produzione stabili nel tempo siano esse termiche o nucleari. Le centrali termiche possono essere anche alimentate a biomasse, che se ben gestite hanno basso impatto ambientale e forniscono anche materia prima per l'industria chimica al posto del petrolio. Per il nucleare resta il problema della sua scarsa accettabilità sociale, legata alla scarsa sicurezza percepita. Sicurezza e profitto non sempre vanno d'accordo e per questo è auspicabile che questa fonte venga utilizzata solo sotto controllo pubblico. Un grande sforzo nella ricerca per giungere rapidamente a soluzioni tecnologicamente più avanzate che garantiscano una maggiore sicurezza degli impianti, migliorino il rendimento ed eliminino del tutto o quasi il problema delle scorie.

Credo che ci sia ancora margine per l'ottimismo. Possiamo immaginare un futuro verde per il nostro pianeta con un'integrazione stretta tra natura ed insediamenti urbani, con trasporti si baseranno su veicoli più leggeri elettrici, oppure a idrogeno, case a emissione zero e forse energeticamente autonome. Nelle città il verde si integrerà con gli edifici in una sorta di moderna versione dei giardini pensili. Le fonti di energia saranno ripartite tra rinnovabili, biomasse e nucleare di nuova generazione. Il fotovoltaico sarà integrato negli edifici mentre l'eolico sarà prevalentemente off-shore. Il nucleare si sarà evoluto verso reattori di IV generazione, che prepareranno la strada ai reattori ibridi, che a loro volta saranno sostituiti da reattori a fusione. Perché tutto ciò si realizzi occorrerà investire moltissimo nella ricerca, a tutti i livelli da quello accademico fino a quello industriale. In questo scenario ottimistico continueremo a conoscere il livello di benessere cui siamo abituati e vivremo in un mondo probabilmente più armonioso senza il rischio di alterazioni climatiche e senza che montagne di rifiuti ci travolgano. Tuttavia investire molto sulla ricerca significa fare anche qualche sacrificio oggi perché i nostri figli e nipoti vivano in un mondo migliore dell'attuale