

APPUNTI SUL NUCLEARE

Francesco Gonella
Dipartimento di Scienze Molecolari e Nanosistemi
Università Ca' Foscari Venezia

Maggio 2011

Premessa

Il problema nel voler formarsi un'opinione sensata e obiettiva sul nucleare è costituito in gran parte dalle fonti di informazione, che risultano il più delle volte contraddittorie non solo nelle analisi proposte, ma a volte persino nei dati riportati. La motivazione di questo stato di cose è che la maggior parte delle fonti di informazione di più facile accesso (soprattutto mass media, ma anche pubblicazioni divulgative) abbraccia o rifiuta l'ipotesi nucleare sulla base della propria appartenenza a una ideologia politica o a una qualche comunità o corporazione. Altre fonti usano invece riportare analisi parziali o errate come frutto di ignoranza o semplice malafede.

Tra le molte consultate (sia pro che contro), la mia scelta è caduta nei seguenti documenti, da cui è ricavato la maggior parte di quanto riportato nel seguito. I primi due sono il frutto del lavoro di gruppi di studio sul nucleare costituiti da esperti riconosciuti, a livello internazionale, nei settori: energia, analisi politica, economia, ingegneria nucleare, pianificazione, ambiente, conflitti. Il terzo è servito per la completezza dei dati riguardanti l'energia; a questi è aggiunto infine, per l'approccio aggiornato e comparativo, il volume di Leonardo Maugeri (direttore del settore "Strategie e Sviluppo" dell'ENI, nonché membro dell'*Energy Advisory Board* e del *World Economic Laboratory* del MIT).

- [1] *International Atomic Energy Agency*, "International Status and Prospects of Nuclear Power", 2009;
- [2] *Massachusetts Institute of Technology*, "The Future of Nuclear Power: an Interdisciplinary MIT Study", MIT Press, 2003 e 2009;
- [3] *International Energy Agency*, *World Energy Outlook 2009*;
- [4] L. Maugeri, "Con Tutta l'Energia Possibile", Sperling & Kupfer 2008.

La situazione

I maggiori nodi del problema nucleare (inteso come problema di valutazione dell'opportunità di una scelta energetica significativamente basata sul nucleare) sono:

- il costo, ovvero la reale convenienza economica del nucleare;
- la sicurezza degli impianti;
- lo smaltimento dei rifiuti nucleari;
- il controllo sulla non-proliferazione parallela di armamenti nucleari;
- l'efficacia del nucleare nell'abbattimento delle emissioni di gas-serra;
- la disponibilità effettiva di combustibile nucleare (soprattutto uranio).

A questi vanno poi aggiunti altri aspetti in qualche modo subordinati, quali:

- la gestione continuata del combustibile nucleare;
- il mantenimento della fiducia pubblica nell'energia nucleare;
- la disponibilità di forza lavoro in possesso delle necessarie competenze;
- la gestione e accettazione del trasporto di combustibile nucleare;
- l'accertamento sull'accettabilità delle infrastrutture nelle nazioni che introducono il nucleare.

In questo documento sono raccolti alcuni dati e conseguenti analisi riguardanti essenzialmente i primi punti. Per citare il gruppo di lavoro del MIT [2], "I criteri relativi ai costi e al problema dei rifiuti sono probabilmente i più cruciali nel

determinare il futuro del nucleare”, e comunque questi sono gli aspetti riguardo ai quali è più facile disporre di dati a sufficienza per formarsi un’opinione.

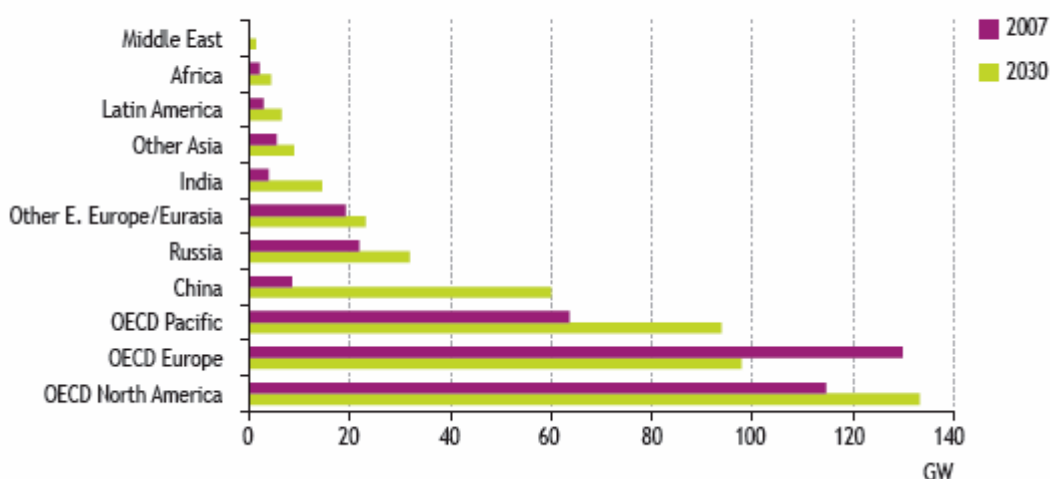
Ad oggi, la situazione del nucleare è la seguente [1,3]:

- 443 reattori nucleari operativi al mondo (disseminati in 29 nazioni);
- circa il 14% di contributo alla fornitura mondiale di elettricità;
- circa il 6% di contributo all'energia totale utilizzata nel mondo;
- 64 reattori in costruzione, dei quali:
 - 56 in Estremo Oriente o nell'Est europeo;
 - 2 in Europa occidentale;
 - 2 in SudAmerica;
 - 1 in Medio Oriente;
 - 1 in Nord America.

La maggior parte dei reattori sono i cosiddetti reattori di terza generazione, che costituiscono anche quelli su cui puntano i progetti nazionali, e cioè *Pressurized Water Reactors* (258 esistenti) e *Boiling Water Reactors* (91).

Le stime sul futuro del nucleare variano moltissimo data la complessità e l’interconnessione dei fattori che lo influenzano. L’IEA presentava [3] nel 2009 come scenario di riferimento il seguente:

Figure 1.16 • Nuclear power-generation capacity by region in the Reference Scenario



Da parte sua, l'IAEA [1] conferma una crescita prevista moderata, e localizzata al di fuori dei G20. Se non altro, e anche senza tener conto di Fukushima, questo attesta come il nucleare rimarrà comunque in posizione subalterna: tenendo conto del trend stimato del consumo energetico globale [3], nel 2030 il contributo del nucleare all’energia utilizzata nel mondo si attesterebbe comunque attorno al 10%.

Il costo del nucleare

Questo è per certi aspetti il nodo più complesso, e quello sul quale vengono elargiti i dati più contraddittori. Un po' dappertutto sono rintracciabili tabelle con il costo comparativo di un KW di energia elettrica da nucleare e da altre fonti, ed è facile constatare la contraddittorietà dei numeri riportati. A seconda della fonte di informazione, l'elettricità da nucleare costa *considerevolmente meno* oppure *considerevolmente più* di quella da solare, eolico, gas, carbone, ecc.. Di fatto, i numeri cambiano (sia per il nucleare che per le altre fonti) a seconda che il calcolo del costo dell’energia si riferisca a:

- impianto funzionante oggi;
- impianto funzionante con tecnologie in sviluppo ma non disponibili oggi;
- presenza o meno di politiche di incentivo;

e a seconda che tenga conto o meno:

- dei costi reali di allestimento;

- dei costi di dismissione o smantellamento;
- dei vari scenari sull'andamento futuro del mercato dei rispettivi combustibili e/o materiali e/o tecnologie.

Appare opportuno quindi soffermarsi sulle varie "voci" che entrano nella definizione del costo del nucleare. La prima considerazione di carattere economico riguarda i costi iniziali, o l'investimento necessario a porre in opera una centrale nucleare. Un dato di fatto è che da nessuna parte al mondo investitori privati comperano né finanziano impianti nucleari, e solo continui e massicci interventi statali sostentano l'opzione nucleare.

La spesa di costruzione di una centrale nucleare raffreddata ad acqua da 1000 MW è stimata [2] essere di circa 1,5 miliardi di €. Questa stima non deve però essere confusa con il costo reale della messa in opera, in quanto si riferisce esplicitamente a sole valutazioni ingegneristiche. I calcoli infatti sono parametrizzati su un tempo convenzionale (*engineering-based*) di 5 anni per la costruzione dell'impianto nucleare, mentre il tempo effettivo è diverso: in Occidente, considerando tutti i reattori ultimati nel quinquennio 2001-2005, la costruzione è avvenuta in media in 109 mesi (fonte IAEA citata da [4]). Aggiungendo poi il tempo necessario a ottenere permessi, autorizzazioni e valutazioni di impatto ambientale nonché quello per i lavori di connessione alla rete elettrica, i tempi *reali* si attestano in media sui 200 mesi (16,6 anni) [4]. Il nodo costituito dalla necessità di consenso pubblico sui siti di costruzione degli impianti, unito a quello della ricerca di consenso elettorale degli amministratori locali, rendono quindi inutilizzabile la stima di costi basata solo su fattori ingegneristici¹.

Riguardo ai costi a medio-lungo termine, una volta concluso il suo ciclo di vita un reattore va fermato e smantellato (*decommissioning*). La situazione [1] è la seguente:

- 117 sono i reattori finora spenti nel mondo;
- 10 sono completamente smantellati con siti messi a disposizione per uso pubblico;
- 18 sono parzialmente smantellati e isolati per immagazzinamento a lungo termine.

Le motivazioni dietro ai numeri di cui sopra hanno a che fare con i tempi richiesti dall'operazione, e quindi in ultima analisi con i costi. Nel migliore dei casi, smantellare una centrale costa (per un reattore raffreddato ad acqua da 1000 MW) circa 400 milioni di €, fino ad arrivare a circa 2 miliardi di € per i reattori inglesi raffreddati a gas. Per citare Maugeri [4], "La sottovalutazione iniziale e in itinere delle spese è stata talmente abnorme da sollevare problemi per la fiscalità di interi paesi al momento in cui, per esempio, è stata valutata la possibilità di privatizzare imprese pubbliche operanti nel nucleare, come è accaduto in Gran Bretagna e in Francia. Così, per esempio, nel 2001 la *British Nuclear Fuels Limited* (posseduta dallo Stato) aveva accumulato 38 miliardi di € di costi da sostenere, in gran parte dovuti a oneri di smantellamento dei suoi impianti di riprocessamento nucleare."

Viene poi il problema del costo della collocazione finale dei rifiuti a elevata radioattività: gli Stati Uniti da soli hanno già speso oltre 5,4 miliardi di € *soltanto in studi e progetti di fattibilità* per individuare i siti di stoccaggio adeguati (fonte MIT citata da [4]). Si prevede che la costruzione e messa in opera *del solo sito* individuato finora come adatto (Yucca Mountain, nel deserto del Nevada) costerà complessivamente attorno ai 70 miliardi di € (stime del Dipartimento dell'Ambiente degli Stati Uniti). Al di là del costo, non è ancora stata comunque dimostrata la fattibilità esecutiva della soluzione geologica, né vi è nella comunità scientifica un consenso generalizzato sul tema del rischio connesso al confinamento geologico, persistendo infatti divisioni profonde tra scienziati ed esperti.

Per quel che riguarda il costo del combustibile, il 40% delle richieste di uranio vengono soddisfatte (dati 2008) da fornitori secondari -uranio immagazzinato o materiale ex-militare- e da materiali riciclati. Questo stato di cose aveva finora mantenuto basso il prezzo dell'uranio, ma nel giro di 5 anni esso è aumentato di circa 10 volte come reazione anticipata alla crescita della domanda e al depauperamento delle forniture secondarie [1].

Al di là di tutte le considerazioni di cui sopra, vi è comunque un dato di fatto: mentre una comparazione obiettiva tra i costi del nucleare e delle fonti a combustibile fossile può essere perlomeno tentata, il paragone -dal punto di vista economico- con fonti rinnovabili è viziato dal fatto che gli stanziamenti della ricerca per queste ultime sono stati negli ultimi decenni grandemente penalizzati a favore del nucleare, che di fatto ha assorbito stanziamenti di cui non viene mai comparato l'ammortamento rispetto ai molto minori stanziamenti a favore di fonti rinnovabili. I futuri costi *reali* delle altre fonti energetiche rinnovabili infatti dipenderanno pesantemente -secondo tutte le stime- dagli investimenti

¹ A titolo di esempio, si osserva che una simile situazione ha già comportato per la centrale attualmente in costruzione in Finlandia un raddoppio del budget iniziale nel giro di pochi anni.

iniziali che si vorranno rispettivamente assegnare, nonché dalle normative nazionali e internazionali sugli incentivi fiscali².

Un ultimo accenno merita la possibilità che tecnologie in sviluppo (su tutte, i reattori di quarta generazione) diano risposte agli interrogativi di cui sopra. Le stime attuali [4] per i reattori di quarta generazione, che puntano effettivamente a ottenere costi più competitivi, attestano però una loro *probabile* disponibilità solo dopo il 2030.

E' interessante notare come, riguardo ai costi, i punti di vista dello scienziato e dell'imprenditore possano essere ciascuno corretto all'interno del proprio ambito, dando però luogo paradossalmente a conclusioni che indicano scelte antitetiche: se da una parte può essere sensato, in generale, investire su un progetto che promette dei vantaggi economici e ambientali, la stima per cui debbano passare una ventina d'anni prima che l'investimento stesso *cominci* a fruttare rende significativo il rischio che nel frattempo le tecnologie legate a fonti alternative (solare e idrogeno, tra tutte), nonché le stesse tecnologie nucleari, rendano il progetto su cui si investe drammaticamente obsoleto e "perdente". Val la pena di rimarcare che, oltre a nessun investitore privato, nessuna compagnia assicuratrice al mondo accetta di sostenere questo azzardo: certamente un economista non guarderà (soltanto) ai prezzi del KW da nucleare o alla riduzioni di emissione di CO₂, quanto piuttosto al tempo necessario perché l'impianto sia in essere, e ancor più al tempo necessario per l'ammortamento dell'investimento.

La sicurezza del nucleare

Anche le stime del rischio sono viziate dalla metodologia con cui vengono effettuate. Utilizzando la definizione di rischio come prodotto della frequenza di accadimento di qualcosa per la gravità delle sue conseguenze, risulta chiaro come sia difficile quantificarlo in una situazione in cui intervengono fattori che possono essere diversissimi a seconda dei singoli impianti o siti.

Riguardo alla frequenza di accadimento di un incidente con conseguenze per la popolazione, le stime concordano nel quantificarla come virtualmente nulla, ma *solo nel caso che tutto venga messo in opera, mantenuto e gestito in modo ottimale* [2], ciò che il MIT riassume nel concetto di *best practices* specifiche. Di fianco quindi alla sicurezza stimata di nuovo su sole basi ingegneristiche, permangono vincoli più difficilmente controllabili, relativi ad esempio alla componente umana. In Francia, *soltanto nel mese di luglio 2008*, si sono verificati 4 incidenti a impianti nucleari (Tricastin 2 volte, Romans-sur-Isère, Rhône Valley) che hanno comportato rilascio di sostanze radioattive nell'ambiente o contaminazioni ad esseri umani. Le autorità inquirenti hanno concluso che gli incidenti di Tricastin hanno rivelato "...una catena di malfunzionamenti e di negligenze umane..." (fonte: UNEP Year Book 2009, *United Nations Environment Programme*)³.

E' opportuno rilevare in questo senso un dato di fatto: supponiamo che venga stimata una probabilità X che un certo evento accada. Da un punto di vista probabilistico, la probabilità *reale* dell'accadimento *non* è X , bensì $[(X \times P_X) + (P_Y \times Y)]$, vale a dire X moltiplicato per la probabilità P_X che la sua stima sia corretta, più la probabilità P_Y che la stima sia sbagliata moltiplicato per la probabilità Y che l'evento accada se la stima è -appunto- sbagliata.

La sicurezza richiesta contro un possibile attacco terroristico è ancora più difficile da quantificare. La British Nuclear Fuel definisce semplicemente "inimmaginabile" lo scenario di un aereo che si schianta su una centrale, mentre il

² Un discorso a parte meriterebbe lo scenario nel quale -in attesa che investimenti significativi nelle altre fonti rinnovabili diano il loro frutto in termini di convenienza economica- si dedicassero parte degli stanziamenti a lungo termine sul nucleare a piani di risparmio energetico diffusi e massicci. Difficilmente si trovano comparazioni di questo tipo, che riguardano cioè il costo del KW *prodotto* rispetto a quello del KW *risparmiato* (ad esempio in isolamenti degli edifici e gestione della rete di trasporti); si veda ad esempio <http://www.rmi.org/>.

³ Non si affronta qui il caso dell'incidente alla centrale di Cernobyl (che non è pertinente a questa analisi soprattutto alla luce della differenza tra le moderne tecnologie di funzionamento e controllo rispetto a quelle operative a Cernobyl nel 1986) se non per citare come sia possibile fornire dati discordi. Il rapporto del 2006 del Cernobyl Forum dell'ONU (*panel* comprendente tra le altre l'IAEA, la FAO, la Banca Mondiale e l'Organizzazione Mondiale della Sanità) da una parte mette in guardia sull'estrema difficoltà nel produrre stime attendibili del numero di morti ascrivibili a Cernobyl, dall'altra riferisce comunque una stima secondo cui qualche migliaio di tumori letali sarebbero imputabili all'incidente. Circa 4000 casi di tumore alla tiroide (non necessariamente mortale) sono legati con ragionevole certezza all'esposizione derivante dall'incidente, così come lo è l'aumento significativo di morti da patologie da immunodepressione a causa dello sradicamento delle popolazioni dai territori d'origine senza la speranza di un ritorno. L'editorialista scientifico di un noto quotidiano afferma invece che le conseguenze dell'incidente dimostrano che il nucleare è "la fonte d'elettricità più sicura oggi disponibile", poiché, a fronte della sua gravità, "il numero massimo di morti attribuibili all'incidente di Cernobyl è 59".

gruppo di lavoro del MIT afferma che “Il livello a cui gli impianti nucleari debbano essere messi in grado di resistere a possibili attacchi terroristici deve ancora essere attestato” [2].

Riguardo al controllo sulla non-proliferazione parallela di armamenti nucleari, “La minaccia di una proliferazione di armi nucleari legata alla produzione e al commercio illegale di uranio arricchito o di plutonio è altissima” [4]. Di fatto, se una maggiore diffusione di centrali a ciclo chiuso appare in grado di migliorare la situazione riguardo al problema dello smaltimento o l’immagazzinamento del combustibile radioattivo, motivi tecnologici indicano proprio nel ciclo chiuso la fonte per la produzione di plutonio suscettibile di venir venduto illegalmente a paesi o gruppi terroristici [2,4]. In particolare, secondo il MIT la ricerca progettuale dovrebbe prendere in considerazione solo quella tecnologia che non produca -durante il normale funzionamento- materiale utilizzabile per armamenti. *“Il ciclo chiuso correntemente utilizzato in Europa Occidentale e Giappone, detto PUREX/MOX, non soddisfa a questo criterio”* [2] (il corsivo è nell’originale).

Un commento

In generale, di fianco a molte fonti di informazione parziali, ideologicamente orientate, in malafede o semplicemente stupide, ve ne sono molte altre che riportano dati corretti e molto circostanziati; il problema spesso sta nella loro “incompletezza disciplinare”⁴. Per volontà o per scarsa informazione, dati parziali (o che non tengono conto di aspetti altrettanto fondamentali di quelli da cui sono ricavati) vengono usati a supporto di analisi politicamente orientate. Senza che vi sia un effettivo bisogno di entrare nel merito della comparazione tra i costi energetici delle diverse fonti, secondo me che nella scelta nucleare vi sono, dal punto di vista economico, dei punti deboli intrinseci, tra l’altro legati tra loro da evidenti *feedback* di rinforzo, che sono:

- costi iniziali molto alti;
- rischi finanziari troppo alti per attirare investitori;
- tempi molto lunghi di attuazione;
- costi altissimi per la dismissione e lo smaltimento delle scorie;

ma soprattutto:

- “drenaggio” *non sostenibile* di fondi dedicabili allo sviluppo di fonti alternative o (con effetto immediato o quasi) a programmi di risparmio energetico.

Dal punto di vista della sicurezza, se gli aspetti tecnico-ingegneristici sembrano indicare un livello di rischio veramente basso, altrettanto non si può dire riguardo a:

- sicurezza degli impianti a seguito di negligenze o errori umani;
- sicurezza rispetto a calamità naturali;
- sicurezza rispetto ad attacchi terroristici;
- sicurezza nella gestione dei rifiuti radioattivi;
- sicurezza rispetto a commercio di materiale per armamenti nucleari.

Nella sezione conclusiva del suo documento, il gruppo di lavoro del MIT afferma che [2] “Non abbiamo trovato, e sulla base delle nostre conoscenze attuali non crediamo sia realistico aspettarci, che vi siano nuovi reattori e nuove tecnologie sul ciclo del combustibile in grado di risolvere contemporaneamente i problemi dei costi, della sicurezza, dei rifiuti e della proliferazione di armamenti”.

Infine, un commento dopo Fukushima, essendo il resto del corpo di questa nota redatto prima della tragedia giapponese. Si parla un po' dappertutto della necessità di un *ripensamento*. Personalmente, non sono d'accordo: quello di cui c'è bisogno non è un ri-pensamento, quanto piuttosto un "pensamento" ex ante, fatto in modo serio, lungimirante e -una volta per tutte- non politicamente ideologizzato. Riguardo alla lungimiranza, notiamo come dai documenti dell'*U.S. Geological Survey* si evince che terremoti di intensità Richter sopra i 9.0 gradi tendono ad accadere nel mondo più frequentemente della vita media di una centrale nucleare, e ovviamente nelle zone a più alto rischio sismico. Ciononostante, da più parti sembra che lo tsunami conseguente al terremoto sulla costa orientale del Giappone sia stato un evento *eccezionale e del tutto imprevedibile*. A mio modo di vedere, quanto è successo impone

⁴ Un preoccupante esempio è costituito da alcuni interventi sul nucleare da parte di uno dei Presidenti onorari della Società Italiana di Fisica, interventi imbarazzanti dal punto di vista logico e retorico.

non tanto il ripensamento dell'opzione nucleare, quanto piuttosto il ripensamento delle modalità con cui la pianificazione da parte dell'uomo attesta la stima del rischio, ed applica il principio di precauzione e la valutazione costi/benefici.