

## **“Nucleare per il futuro”**

Agostino Mathis

Se si volesse portare i 10 miliardi di abitanti della Terra previsti al 2050 ad un livello di vita anche solo pari alla metà di quello dell'attuale miliardo benestante, occorrerebbe probabilmente almeno raddoppiare l'attuale disponibilità di energia. Diviene allora indispensabile una realistica ed accurata valutazione di quale potrebbe essere a medio-lungo termine un mix di fonti energetiche che permetta all'Umanità di disporre di abbondante energia evitando l'emissione di gas-serra, in particolare CO<sub>2</sub>.

I Governi hanno concordato, alla Conferenza dello United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC) tenutasi a Cancun, Mexico nel 2010 (COP-16), che l'incremento medio della temperatura globale, rispetto ai livelli pre-industriali, debba essere mantenuto al disotto dei 2 °C, per evitare possibili gravi destabilizzazioni del clima. Esiste un ampio consenso internazionale che la stabilizzazione della concentrazione atmosferica dei gas-serra e degli aerosol al disotto delle 450 ppm di "anidride carbonica equivalente" (CO<sub>2</sub>-eq) sia consistente con una probabilità del 50% di conseguire il predetto limite dei 2 °C (Scenario 450). Tuttavia, le emissioni di gas-serra continuano ad aumentare rapidamente. Nel Maggio 2013 il livello nell'atmosfera della sola CO<sub>2</sub> ha raggiunto le 400 ppm, con un incremento di 2,7 ppm nel solo 2012. La temperatura media globale è già aumentata di circa 0,8 °C rispetto ai livelli pre-industriali, e, senza interventi addizionali, sono prevedibili ulteriori incrementi da 2,8 °C a 4,5 °C già entro questo secolo.

Il settore dell'energia è la principale sorgente di gas-serra (circa due terzi del totale): l'effetto-serra conseguente è dovuto per il 90% alla CO<sub>2</sub> e per circa il 9% al metano (CH<sub>4</sub>), trattato in termini del suo CO<sub>2</sub>-eq. Il consumo totale di energia continua ad aumentare, guidato dai combustibili fossili che forniscono oltre l'80% del totale dell'energia consumata, una quota che va crescendo dalla metà degli anni 1990, a causa dello sviluppo dei grandi Paesi di nuova industrializzazione, che utilizzano largamente il carbone.

La International Energy Agency (IEA) ha recentemente pubblicato il rapporto "Redrawing the energy-climate map" (Rif. 1), che prende atto del grave ritardo con cui si avviano le azioni di mitigazione raccomandate dai climatologi, ed in particolare quelle necessarie per lo scenario che intende limitare i gas-serra a 450 parti per milione di CO<sub>2</sub>-eq (Scenario 450). Individua allora "un programma di emergenza" (Scenario 4-for-2 °C), basato su quattro tipi di interventi, da attuare su iniziativa dei singoli Paesi prima del 2020, data prevista per l'entrata in vigore di un nuovo accordo internazionale sul clima. Si tratta, tuttavia, di interventi tutt'altro che facili da attuare, in ispecie da parte dei Paesi in via di sviluppo. D'altra parte, conseguire l'obiettivo dei 2 °C in assenza di tali interventi, anche se forse tecnicamente fattibile, richiederebbe in un futuro non lontano una ampia adozione di costosissime tecnologie capaci di "emissioni negative" di CO<sub>2</sub>, cioè in grado di estrarre dall'atmosfera più CO<sub>2</sub> di quanta ne immettano. Per la fine del secolo, infatti, le emissioni nette di CO<sub>2</sub> del sistema energetico dovrebbero passare dagli attuali oltre 30 miliardi di tonnellate all'anno (Gt/anno) a non più di 5 Gt/anno (meno di un sesto!). Comunque, come vedremo, anche nello Scenario 4-for-2 °C la IEA ritiene necessario dopo il 2020 un netto incremento nell'uso dell'energia nucleare, la quale inoltre potrà portare un efficace contributo anche alle tecnologie capaci di "emissioni negative" di CO<sub>2</sub>.

oooOOOooo

L'energia elettrica rappresenta non più di un quarto o un quinto del consumo di energia primaria: quindi, la riduzione delle emissioni richiederà il massimo impegno nella produzione non solo di energia elettrica, ma soprattutto di combustibili e carburanti, con ridotte o nulle emissioni di carbonio. Le opzioni energetiche da considerare sono: le rinnovabili elettriche, anche quelle non programmabili; le biomasse; la nucleare, come fonte sia di elettricità che di calore.

Riguardo alle “nuove fonti rinnovabili”, cioè l'eolica e la solare fotovoltaica, occorre notare che esse possono produrre solo energia elettrica, ed in modo intermittente e non programmabile, e quindi praticamente non potranno coprire che una frazione della domanda di energia elettrica di un grande Paese industrializzato; inoltre, come detto, il consumo di elettricità non rappresenta più di un quarto o un quinto dell'intero fabbisogno di energia primaria. Quindi il contributo finale delle “nuove fonti rinnovabili” difficilmente potrà superare il 10% dell'energia primaria totale consumata. Le tradizionali fonti idroelettrica e geotermica, e le biomasse, sono già sfruttate ove possibile e opportuno, ma sono limitate da vincoli geografici e fisici. Occorrerebbe allora trovare una sorgente, priva di emissioni di carbonio, che sia in grado di fornire non solo elettricità, ma anche calore e carburante, i quali, come visto, rappresentano la maggior parte dei consumi di energia primaria. Questa sorgente esiste ed è l'energia nucleare. E' necessario quindi definire uno scenario a lungo termine in cui le energie rinnovabili siano integrate nel modo più efficace con l'energia nucleare.

Nel Rif. 2 è descritto uno scenario di questo tipo sviluppato presso il Massachusetts Institute of Technology (MIT) di Boston. Il criterio di progetto basilare per l'economicità della integrazione rinnovabili-nucleare deve tener conto del fatto che sia la fonte nucleare, sia le nuove fonti rinnovabili elettriche, richiedono elevati investimenti nell'impianto, mentre i costi di gestione sono molto ridotti. Di conseguenza, in tutti i casi possibili, gli impianti nucleari dovranno lavorare “a tavoletta” (cioè con continuità, 24 ore al giorno 7 giorni alla settimana, ed alla massima potenza possibile), mentre gli impianti per le rinnovabili elettriche non programmabili (eolici, solari) dovranno poter immettere in rete tutta l'energia offerta momento per momento dagli eventi naturali.

Per far fronte ai tipici, ben noti, diagrammi di carico elettrico, occorre una fonte programmabile in grado di arrivare a coprire da sola anche i picchi massimi (per il caso di assenza completa di sole e vento!): avendo escluso del tutto le fonti fossili, ed in mancanza di sistemi di accumulo, quella non può che essere la nucleare. Ma quando il carico elettrico richiesto non è al massimo, e/o vi è produzione eolica o solare, la sovrapproduzione degli impianti nucleari (che, come detto, conviene che operino sempre “a tavoletta”) deve essere utilizzata in altro modo: ciò è possibile sia in forma elettrica che termica.

La sovrapproduzione degli impianti nucleari può infatti essere ovviamente utilizzata in forma elettrica (fino a circa 1/3 della potenza primaria, per gli impianti attuali), sia per ricaricare impianti idroelettrici ad accumulo, sia per produrre idrogeno per via elettrolitica (anche elettrolisi ad alta temperatura). L'idrogeno può poi essere utilizzato come tale, o nella sintesi di carburanti da biomasse, o aggiunto nei gasdotti del gas naturale.

La sovrapproduzione degli impianti nucleari può però anche essere utilmente utilizzata in forma termica (da circa 2/3 fino all'intera potenza primaria, per gli impianti attuali), semplicemente deviando il vapore ad alta temperatura, in uscita dal reattore, dal turboalternatore verso altri usi, ad esempio per sfruttare i grandi giacimenti di idrocarburi non convenzionali (in sabbie, scisti) evitando emissioni di carbonio, oppure per produrre combustibili e carburanti da biomasse, evitando la combustione delle medesime per fornire calore di processo, od anche infine per riscaldare grandi volumi di sottosuolo, da utilizzare come fonte di energia geotermica in tempi successivi.

Mentre esistono infatti molti sistemi di accumulo di elettricità per compensare produzione e domanda in ambito giornaliero (impianti idroelettrici di pompaggio, batterie, ecc.), soltanto due soluzioni appaiono praticabili per l'accumulo stagionale di energia, che richiede capacità di decine o centinaia di gigawatt-anno: l'accumulo geotermico di calore nucleare, e l'idrogeno, soluzioni che, come già detto, sono attuabili con gli impianti nucleari. Un sistema integrato nucleare-rinnovabili che produca idrogeno, in particolare, può accumulare parte di quell'idrogeno per far fronte anche ai picchi di domanda di elettricità.

Per quanto riguarda poi la produzione di biocarburanti, l'energia nucleare può fornire calore di processo e idrogeno alla bioraffineria, evitando la combustione di biomasse a tali scopi, e triplicando quindi la quantità di carburanti liquidi prodotta per una data quantità di biomassa. Carburanti liquidi possono essere anche prodotti partendo dall'anidride carbonica dell'aria e dall'idrogeno dell'acqua, con il calore e l'elettricità forniti da un impianto nucleare. Secondo il citato Rif. 2, questa opzione potrebbe fornire quantità illimitate di carburante liquido ad un costo non superiore a 2-3 volte quello della elettricità per la stessa produzione di calore. Si noti che la filiera dei carburanti a zero-emissioni, utilizzabili nei normali motori endotermici, potrebbe essere molto più efficace, rispetto alla mobilità elettrica, per la decarbonizzazione generalizzata del settore trasporti, in terra, mare e cielo.

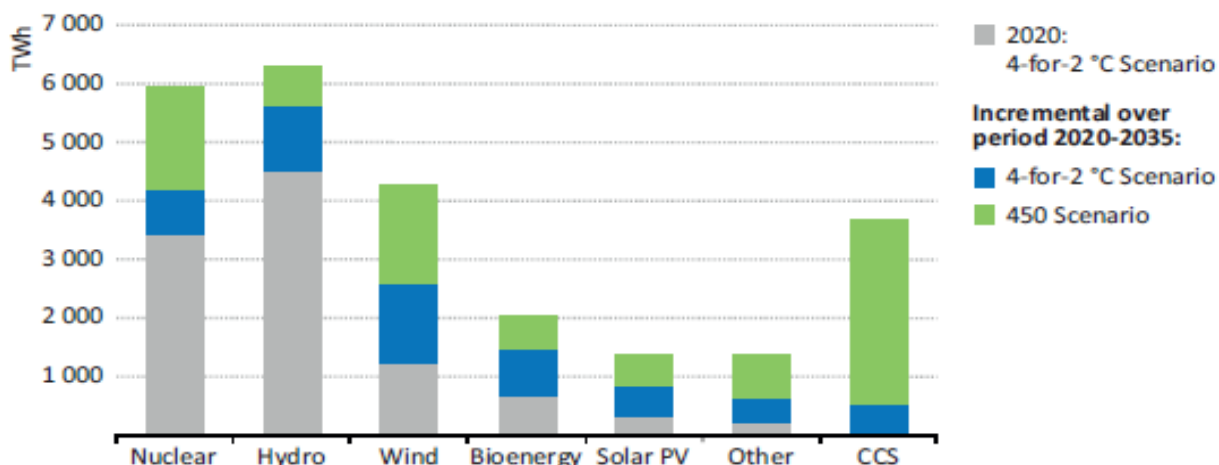
Inoltre, l'utilizzo dell'energia nucleare per un miglior sfruttamento delle biomasse (che all'origine sottraggono CO<sub>2</sub> dall'atmosfera) unito alla tecnologia della Carbon Capture and Storage (Bio-Energy with Carbon Capture and Storage: BECCS), rappresenta un processo capace di ottenere una rimozione netta di CO<sub>2</sub> dall'atmosfera (a differenza della Carbon Capture and Storage convenzionale applicata alle fonti fossili, che riduce semplicemente le emissioni in atmosfera). Si otterrebbe così un processo capace di "emissioni negative" di CO<sub>2</sub>, che, come già detto, potrà divenire essenziale se, come probabile, l'attuale sistema energetico mondiale non riuscirà a stabilizzare le emissioni entro il 2020 per poi ridurle drasticamente nei decenni successivi, come richiesto dallo Scenario 450.

oooOOOooo

Il ruolo dell'energia nucleare appare quindi essenziale ed insostituibile a medio-lungo termine. Diviene quindi indispensabile ed urgente realizzare impianti nucleari comunque in grado di resistere in modo del tutto passivo ad imprevedibili situazioni di emergenza, e che siano in particolare in grado di eliminare tutto il calore di decadimento dopo l'arresto della reazione a catena, ma senza rilasciare all'esterno alcun materiale radioattivo. L'impostazione progettuale dei reattori "a sicurezza passiva" mira proprio a concepire strutture meccaniche e fluidodinamiche in grado di smaltire spontaneamente e a tempo indeterminato tutto quel calore, senza mai raggiungere temperature pericolose per la integrità delle strutture e del combustibile. Riprende in particolare un grande interesse per gli impianti "modulari", comprendenti più reattori ciascuno dei quali abbia un rapporto superficie/volume adeguato allo smaltimento del calore per irraggiamento anche con un limitato incremento delle temperature delle pareti esterne delle schermature.

Nell'ipotesi (ottimistica) che venga attuato lo Scenario 4-for-2 °C proposto dall'IEA (Rif. 1), per adeguarsi in seguito allo Scenario 450 la IEA stessa ritiene poi necessario un netto incremento della produzione di energia elettronucleare, da 3400 terawattora (TWh) nel 2020 a 6000 TWh nel 2035 (venti volte l'attuale consumo totale dell'Italia), come si vede dalla seguente figura 1 tratta da Rif. 1.

**Figure 2.18** ▶ World electricity generation from low-carbon technologies by scenario



Note: Other includes geothermal, concentrated solar power and marine.

**Figura 1**

Ciò significa disporre al 2035 di una potenza elettronucleare installata di circa 1000 gigawatt elettrici (GWe), a fronte degli attuali 380 GWe. Tenuto conto dei vecchi impianti da sostituire, ne consegue la prospettiva di dover porre in linea da qui al 2035 circa 500 nuovi impianti nucleari da 1500 megawatt elettrici (MWe) ciascuno. Sempre dalla figura 1, per soddisfare lo Scenario 450 sarebbe anche necessario introdurre la Carbon Capture and Storage (CCS) per quasi 4000 TWh/anno entro il 2035. Ciò appare estremamente difficile, dato lo stato attuale del tutto immaturo di questa tecnologia, sia dal punto di vista economico che da quello ambientale (per attuare infatti la CCS per quasi 4000 TWh/anno, oltre ai dispositivi di cattura della CO<sub>2</sub> sugli impianti, occorrerebbe realizzare e gestire una infrastruttura di pozzi, tubazioni e stazioni di pompaggio del tutto paragonabile a quella ora in opera per il petrolio, che però è stata realizzata nel corso di oltre un secolo!). Non c'è quindi da stupirsi se in un recente rapporto del World Energy Council (Rif. 3) si afferma tra l'altro: *“The issue with the most dynamic change over the past years is carbon capture, utilization and storage (CCS/CCUS) which is almost flying off the map: without a formal price for CO<sub>2</sub> emission avoidance this technology is at risk of simply being seen as adding cost and bringing down energy efficiency.”*

Allora, per ottemperare allo Scenario 450, occorrerebbe nel 2035 produrre in altro modo ben ulteriori 4000 TWh/anno privi di emissioni. Essendo le “nuove rinnovabili elettriche” fortemente limitate dai noti vincoli logistici e soprattutto operativi (intermittenza non programmabile, che richiede il supporto di quasi altrettanta potenza programmabile di fatto da fonte fossile, o di costosissimi sistemi di accumulo), ed essendo la idroelettrica già fortemente sfruttata almeno nei Paesi sviluppati, non resterebbe che rivolgersi ancora al nucleare, che dovrebbe arrivare a produrre in totale quasi 10.000 TWh/anno.

In effetti, almeno 50 Paesi stanno utilizzando e/o costruendo impianti nucleari, o già prendono per la prima volta in seria considerazione l'energia nucleare per la generazione elettrica, ed anche per il teleriscaldamento e la dissalazione dell'acqua di mare. La metà di essi, infatti, sono “novizi”, che intendono sviluppare l'energia nucleare al fine di far fronte al crescente fabbisogno di energia in maniera efficace e limitando le emissioni di gas-serra. Circa 70 nuovi impianti nucleari di potenza sono ora in costruzione nel mondo, a fronte dei circa 430 in funzione; inoltre, altri

160 impianti sono ordinati o pianificati, e più di 300 sono proposti: in totale, quindi, già si supera il numero di 500 nuovi impianti, necessari per arrivare all'obiettivo previsto dalla IEA nella precedente figura.

oooOOooo

Nonostante le nuove costruzioni, tuttavia, la frazione di energia elettrica di origine nucleare nel mondo, che aveva raggiunto il 16% vent'anni or sono, sta scendendo da anni, ed ora si aggira sul 12%, anche se in valore assoluto l'energia prodotta non è variata di molto. La ragione è che nell'ultimo decennio i consumi elettrici mondiali sono fortemente aumentati, a causa dei grandi Paesi emergenti, come Cina e India, dove la gran parte delle nuove centrali continua ad essere alimentata a carbone.

Come si vede dalla figura 2, tratta da Rif. 4, negli ultimi quarant'anni il netto incremento nella frazione di energia da fonti che non emettono carbonio ("carbon-free") avvenne tra il 1965 ed il 1999, grazie ad un incremento di 100 volte nella produzione di energia elettronucleare e di 6 volte in quella di energia idroelettrica:

#### Growth in Renewables Outpaced by Fossil Fuels

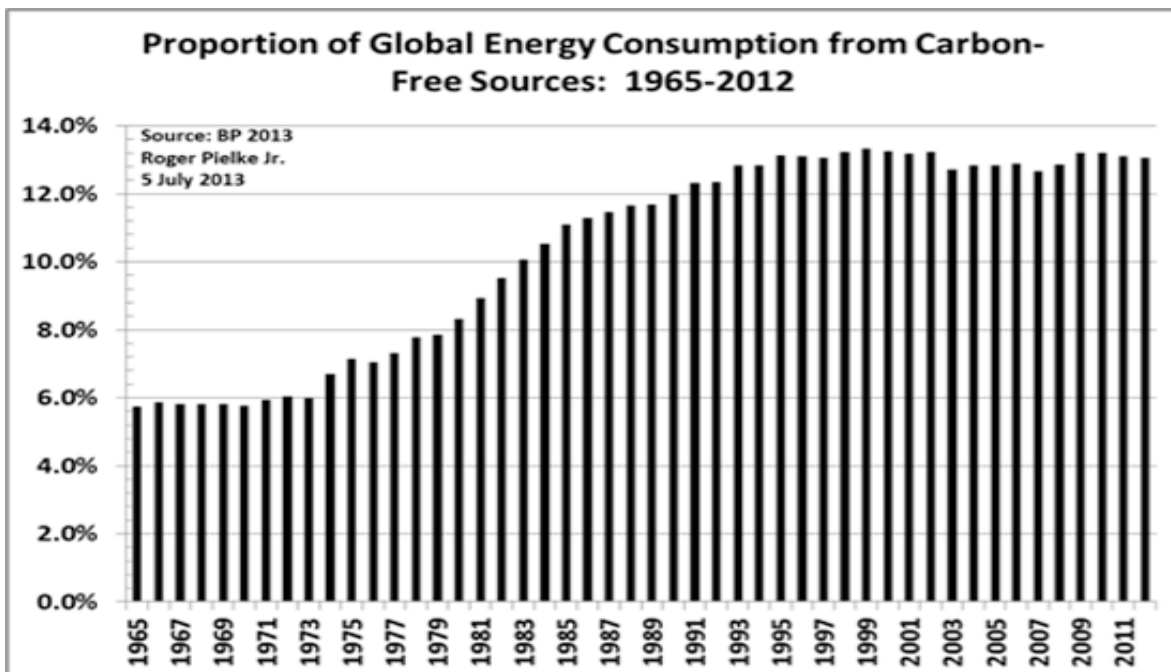


Figura 2

Negli ultimi 15 anni, invece, quella frazione rimane stagnante o addirittura peggiora, nonostante il grande impegno nello sviluppo delle nuove rinnovabili (sole, vento), e i notevolissimi livelli di potenza installata per queste fonti: il fatto è che spesso si dimentica che una centrale nucleare da 1000 megawatt elettrici può produrre in un anno anche più di otto miliardi di chilowattora (kWh), mentre 1000 megawatt di eolico (cioè almeno 200 torri alte 200 m) o di solare fotovoltaico (cioè almeno 1000 ettari occupati da pannelli), a causa della loro intermittenza produrrebbero in un anno non più di uno o due miliardi di kWh, e richiederebbero comunque impianti convenzionali o sistemi di accumulo, di potenza paragonabile, per stabilizzare la rete quando calano il sole ed il vento.

Se quindi si volesse veramente riprendere ad accrescere la frazione di energia da fonti “carbon-free”, occorrerebbe una forte volontà a livello mondiale per bloccare la costruzione di nuove centrali a carbone, ed intraprendere nuovi vasti programmi di costruzione di impianti idroelettrici e nucleari.

La rivista Nature, nel suo numero del 6 dicembre 2012 (Rif. 5), ha pubblicato una "news feature" sui "radical reactors", cioè sulle architetture di reattori nucleari (a fissione) "radicalmente" diverse rispetto a quella attualmente predominante (quella ad acqua "leggera", che come noto era stata preferita a suo tempo dall'industria in quanto già utilizzata nei reattori navali militari).

Infatti, forse anche proprio a seguito dell'incidente di Fukushima, si sta manifestando in tutto il mondo un crescente interesse per queste diverse architetture. Molte di queste architetture in realtà riprendono concetti, ed anche esperimenti, già acquisiti cinquanta o sessant'anni fa, all'epoca dello "stato nascente" dell'energia nucleare, e poi abbandonati per ragioni di politica militare/industriale. Ritorna ad esempio anche l'interesse all'utilizzo del Torio, molto più abbondante dell'Uranio, quale materia prima per il combustibile nucleare (previa sua trasmutazione nell'isotopo fissile Uranio 233).

Nel mondo sono oggi in corso oltre 50 progetti innovativi, specie in Russia ed in USA, mentre l'Europa anche qui sembra perdere il passo. Molti di questi reattori, di piccole o medie dimensioni e in grado di fornire calore ad alta temperatura, sembrano particolarmente adatti ad inserirsi nello scenario prima descritto, sviluppato presso il MIT (Rif. 2), con l'obiettivo di integrare le energie rinnovabili con l'energia nucleare. Alcuni di questi nuovi reattori, basati sui neutroni veloci, potrebbero portare un rilevante contributo alla risoluzione di molti problemi dell'attuale "sistema nucleare". Essi infatti moltiplicano di ordini di grandezza l'energia ottenibile dall'uranio naturale, ed inoltre possono funzionare bruciando gli Attinidi, cioè gli elementi pesanti fortemente radioattivi e di lunga vita generati dall'irraggiamento neutronico del combustibile nucleare nei comuni reattori ad acqua. Resterebbero quindi da sistemare soltanto i prodotti di fissione, molto meno voluminosi e a vita relativamente breve, per i quali basterebbe un deposito semisuperficiale, sia pure ben progettato e costruito (si noti che, dopo qualche secolo, la radioattività residua sarebbe addirittura inferiore a quella dei minerali di uranio e/o di torio da cui era stato avviato l'intero ciclo del combustibile nucleare, pervenendo così a regime a mantenere, o anzi a ridurre, il “carico” di radioattività naturale del Pianeta Terra!).

### **Riferimenti**

- (1) “Redrawing the energy-climate map – World Energy Outlook Special Report” International Energy Agency (IEA), 10 June 2013.
- (2) Charles W. Forsberg “Nuclear Energy for Variable Electricity and Liquid Fuels Production: Integrating Nuclear with Renewables, Fossil Fuels, and Biomass for a Low-Carbon World” MIT-NES-TR-015 - September 2011.
- (3) “2013 World Energy Issues Monitor” World Energy Council – 2013.
- (4) Roger Pielke, Jr “Clean Energy Stagnation” The Breakthrough Institute, 09 July 2013.
- (5) M. Mitchell Waldrop “Radical Reactors” Nature, 06 December 2012.

*Roma, 3 novembre 2013*

*Agostino Mathis*