

Sulla reintroduzione del nucleare in Italia

Giorgio Parisi

Il contesto: un'energia che cambia sotto i nostri occhi

Bisogna analizzare la convenienza dell'uso dell'energia nucleare nel contesto generale della produzione energetica. Dico subito che non si tratta di un esercizio accademico: la questione è concreta, urgente e riguarda le scelte che il nostro Paese dovrà compiere nei prossimi anni. Il governo ha presentato un disegno di legge delega per riportare il nucleare in Italia, puntando sui cosiddetti Small Modular Reactors, i piccoli reattori modulari, noti come SMR, e su tecnologie di quarta generazione. Vale dunque la pena ragionare con calma, guardando ai numeri e alla fisica delle cose, prima di farsi trascinare dall'entusiasmo o dalla paura.

Il punto di partenza è semplice e incontrovertibile: non c'è dubbio che il solare sia oggi la soluzione di gran lunga più conveniente per produrre energia elettrica. Non lo dico per partito preso, lo dicono i dati. Il costo livellato dell'energia (il cosiddetto LCOE, che tiene conto dell'intero ciclo di vita di un impianto) per il fotovoltaico su scala industriale si aggira oggi tra 35 e 50 dollari per megawattora, a seconda della regione. Per il nucleare di nuova costruzione in Europa, le stime più recenti indicano 150–180 dollari per megawattora. Secondo il rapporto Lazard del 2025, probabilmente l'analisi più autorevole in materia, il nucleare si colloca tra 141 e 220 dollari per megawattora, il che ne fa la fonte più costosa tra tutte quelle su scala industriale.. Parliamo di un fattore tre o quattro di differenza rispetto al solare: non è una sfumatura, è un abisso economico.

Quanto ai costi di impianto degli SMR, le stime variano enormemente a seconda delle fonti: gli studi accademici più ottimistici indicano 4.000–6.000 dollari per

kilowatt, l'Agencia Internazionale dell'Energia stima circa 10.000 dollari per kilowatt per i primi impianti in Europa. In nessuno di questi scenari i conti tornano.

La capacità produttiva del solare è in crescita costante e impressionante. Nell'Unione Europea, nel 2025, solare ed eolico insieme hanno superato il nucleare, generando il 30 per cento dell'elettricità contro il 23 per cento dell'atomo, ma il dato più significativo e storico è un altro, eolico e solare hanno superato per la prima volta *tutti* i combustibili fossili (30% vs 29%) in Europa nella generazione dell'elettricità.

A livello mondiale, ogni anno si installano centinaia di gigawatt di nuova capacità fotovoltaica, e le previsioni indicano che entro il 2030 la potenza solare installata dovrebbe almeno raddoppiare rispetto ai livelli attuali. Non solo: i costi continuano a scendere. Secondo BloombergNEF, il costo del solare potrebbe diminuire ulteriormente del 30 per cento entro il 2035. Si tratta di una tecnologia che percorre una curva di apprendimento virtuosa, più se ne installa, meno costa. Dal 2009 a oggi, il costo del fotovoltaico è diminuito di cinque volte. Il nucleare, al contrario, segue una curva di apprendimento invertita: il costo del kilowattora nucleare è aumentato del 49 per cento nello stesso periodo, in particolare dopo l'incidente di Fukushima del 2011 e i conseguenti requisiti di sicurezza aggiuntivi. Quando una tecnologia costa di più man mano che la si realizza, anziché di meno, è un segnale che non può essere ignorato.

Il problema dell'intermittenza e il mercato dell'energia

Naturalmente, il solare ha un limite ben noto: produce energia di giorno. Di notte il sole non c'è, e questo è un fatto che nessun ottimismo può cancellare. Per questo motivo, quando si discute di energia, occorre sempre ragionare in termini di sistema e non di singola fonte.

Qui interviene un aspetto del mercato elettrico che molti non conoscono, ma che è cruciale per capire l'economia dell'energia: il prezzo dell'energia elettrica non è fisso, ma varia nel corso della giornata. In Italia, come nel resto d'Europa, il prezzo viene aggiornato ogni quindici minuti. Questo significa che il valore di un kilowattora

prodotto a mezzogiorno è diverso da quello prodotto alle tre di notte. Ed è qui che le cose si fanno interessanti.

Man mano che la quota di solare nel sistema elettrico aumenta, i prezzi dell'energia nelle ore diurne calano, perché c'è grande abbondanza di offerta. Già adesso si registrano con frequenza crescente situazioni in cui il prezzo dell'energia diventa negativo: i produttori, cioè, devono pagare qualcuno perché assorba la loro elettricità in eccesso. Questa situazione, apparentemente paradossale, diventerà sempre più frequente con l'aumento della produzione fotovoltaica.

.Ora, pensiamo a cosa significa tutto questo per una centrale nucleare. Le centrali nucleari sono tecnicamente capaci di modulare parzialmente la propria potenza, tuttavia una centrale completamente spenta richiede circa un giorno per ripartire a freddo. Il problema reale, tuttavia, non è tecnico: è economico. Un reattore nucleare ha costi fissi elevatissimi, mentre i costi variabili del combustibile sono molto bassi. Questo significa che ogni ora in cui la centrale opera a potenza ridotta, o resta ferma per lasciare spazio al solare, è un'ora in cui quei costi fissi pesano senza essere compensati da ricavi adeguati. In un mercato sempre più dominato dal solare, con prezzi diurni in caduta libera o addirittura negativi, il nucleare si troverebbe sistematicamente a dover scegliere tra produrre energia quando nessuno la vuole, pagandone il prezzo, oppure ridurre la potenza, peggiorando un'economia già sfavorevole. In entrambi i casi, i conti non tornano.

La risposta razionale a questo problema è investire in sistemi di accumulo, le batterie, e nel potenziamento della rete elettrica, in modo da immagazzinare l'energia solare prodotta di giorno e redistribuirla nelle ore serali e notturne. L'Italia ha la fortuna di poter fare questo da tantissimo tempo, utilizzando gli invasi idroelettrici: servono investimenti per aumentarne la capacità e le efficienze di accumulo. Il costo delle batterie industriali è già sceso a circa 70 dollari per kilowattora ed è destinato a calare ulteriormente: è calato del 29% nell'ultimo anno. Questa è la strada, e investire nelle infrastrutture di rete e di accumulo è molto più sensato che costruire centrali nucleari destinate a operare in un contesto di mercato che le penalizza e che le penalizzerà sempre di più in futuro.

Gli SMR: piccoli, ma non così diversi

Veniamo ora ai famosi SMR, i piccoli reattori modulari di cui si parla tanto. Bisogna essere chiari: le mini-centrali nucleari da 100–300 megawatt di cui si discute oggi non sono significativamente diverse dalle centrali nucleari tradizionali dal punto di vista della fisica del reattore. Sono sempre centrali di terza generazione, basate sulla stessa reazione di fissione dell'uranio con neutroni lenti (i cosiddetti neutroni termici). Cambia la scala, cambia in parte l'ingegneria, ma il principio è lo stesso.

Questo significa, tra le altre cose, che gli SMR producono lo stesso tipo di scorie radioattive dei reattori convenzionali. La reazione è sempre la stessa, uranio e neutroni lenti, e i prodotti di fissione che ne derivano sono gli stessi isotopi a lunga vita che rendono le scorie nucleari un problema per migliaia di anni. È anche possibile che gli SMR producano più rifiuti radioattivi per unità di energia rispetto ai reattori convenzionali, a causa di un rapporto combustibile-strutture da irradiare meno favorevole.

E qui si apre la questione forse più imbarazzante per chi propone il ritorno al nucleare in Italia: dove mettiamo le scorie? Il nostro Paese non è riuscito, in decenni di tentativi, a costruire un deposito nazionale per le scorie già esistenti, quelle prodotte dalle vecchie centrali chiuse dopo il referendum del 1987 e dai rifiuti radioattivi di origine medica e industriale. Sono oltre 32.000 metri cubi di rifiuti radioattivi disseminati in depositi temporanei sparsi per il territorio, mentre quelli ad altra attività sono stoccati all'estero, in Francia e in Gran Bretagna, a nostre spese. Il governo attuale punta a individuare un sito entro il 2029 e a rendere operativo il deposito non prima del 2039. Aggiungere a questo quadro la produzione di nuove scorie ad alta attività mi sembra, prematuro.

Localizzare le nuove centrali è certamente molto più faticoso e delicato rispetto a localizzare un deposito passivo di scorie radioattive. Il CNAI ha identificato 51 aree adatte alla costruzione del deposito, sparse tra Piemonte, Toscana, Lazio, Basilicata, Puglia, Sardegna e Sicilia. Mi pare che i criteri di esclusione (sismicità, rischio

idrogeologico, vulcanismo, vicinanza a centri abitati, aree protette, presenza di falde acquifere, altitudine, pendenze) adottati per il deposito siano come minimo da usare per le future centrali. Gli spazi disponibili per le centrali sono scarsi

Le centrali di quarta generazione: promettenti, ma lontane

Diverso è il discorso per le centrali di quarta generazione, che rappresentano un approccio genuinamente nuovo alla fissione nucleare. Mi riferisco in particolare a due filoni tecnologici.

Il primo è quello dei reattori a neutroni veloci. A differenza dei reattori attuali, che usano neutroni rallentati (termici) per sostenere la reazione a catena, questi reattori impiegano neutroni ad alta energia. Il vantaggio principale è che possono “bruciare” una parte dei rifiuti ad alta attività, riducendo il volume e il tempo di vita delle scorie più pericolose. Sulla carta, è un’idea affascinante. Ma sulla carta la fisica è sempre affascinante; il problema è la realizzazione pratica.

La tecnologia a neutroni veloci è molto delicata, perché richiede l’uso di refrigeranti speciali, tipicamente sodio liquido o piombo fuso, e materiali capaci di resistere a condizioni di corrosione e irraggiamento estremamente severe. Questa tecnologia è già stata tentata su scala industriale, e l’esito non è stato incoraggiante. Il caso più noto è quello di Superphénix, il grande reattore autofertilizzante franco-italo-tedesco costruito a Creys-Malville, in Francia. Superphénix avrebbe dovuto essere il fiore all’occhiello della tecnologia nucleare europea. In pratica, è stato un fallimento clamoroso.

La costruzione, iniziata nel 1976, fu completata nel 1985. In undici anni di vita operativa, il reattore funzionò effettivamente per soli 53 mesi, ne passò 25 in riparazione e 54 fermo per ragioni amministrative. La Corte dei Conti francese ha stimato il costo complessivo dell’avventura in circa 12 miliardi di euro (del 2010), comprensivi di costruzione, esercizio e arresto, più quasi un miliardo per lo

smantellamento. L'Enel, che partecipava al progetto con un terzo della quota, perse una cifra stimata in non meno di 4.300 miliardi di vecchie lire, qualcosa come 4–5 miliardi di euro attuali. E quei soldi li hanno pagati per decenni i cittadini italiani come sovrapprezzo sull'elettricità.

Il secondo filone tecnologico, forse più promettente, è quello dei reattori a Torio. Il Torio è un elemento più abbondante dell'uranio in natura e ha il vantaggio che il suo ciclo del combustibile produce pochissime scorie a lunga vita. I reattori a Torio, in combinazione con i sali fusi come refrigerante, rappresentano una prospettiva estremamente interessante dal punto di vista scientifico. Ma qui siamo ancora più lontani dalla maturità commerciale: esiste un mini-prototipo cinese da 2 megawatt, e un prototipo da 300 megawatt è in costruzione. Siamo all'alba della sperimentazione, non alla vigilia dell'industrializzazione.

Insomma, le centrali di quarta generazione sono interessanti, e vale la pena investire nella ricerca. Ma presentarle come una soluzione disponibile per i prossimi dieci o quindici anni è semplicemente fuorviante. I reattori a neutroni veloci di nuova concezione, come il BREST-300 russo al piombo o il progetto ASTRID francese al sodio (peraltro già accantonato), sono ancora in fase di prototipo o di studio. I reattori al Torio sono ancora più indietro. Dire che saranno “sul mercato” entro il 2040 è ottimistico; dire che potranno contribuire al mix energetico italiano è, allo stato attuale, un atto di fede.

I costi reali: la lezione dei progetti concreti

C'è un aspetto della storia del nucleare che non dovremmo mai dimenticare, perché si ripete con una regolarità quasi comica, se non fosse tragica: i costi previsti non corrispondono mai a quelli effettivi. Il progetto NuScale negli Stati Uniti, che era il più avanzato tra gli SMR occidentali, ha visto il costo stimato passare da 3,6 a 9,3 miliardi di dollari, con una quasi triplicazione dei costi, prima di essere definitivamente abbandonato nel 2023 perché nessuno voleva più comprare l'energia che avrebbe prodotto.

In Cina, il reattore Shidao Bay 1, un SMR ad alta temperatura, è costato il 200 per cento in più del previsto ed è entrato in funzione con sedici anni di ritardo. I reattori galleggianti russi hanno superato le stime iniziali del 300 per cento. In Europa, il reattore EPR di Flamanville, che non è un SMR ma un grande reattore di terza generazione, doveva costare 3,3 miliardi di euro e ne è costati quasi 20, con quindici anni di lavori invece dei sei previsti.

Questi non sono incidenti di percorso: sono una caratteristica strutturale dell'industria nucleare. I reattori sono sistemi estremamente complessi, in cui i requisiti di sicurezza impongono standard costruttivi e autorizzativi che inevitabilmente fanno lievitare i costi e i tempi. Gli SMR, in teoria, dovrebbero superare questo problema grazie alla produzione in serie in fabbrica. Ma è una teoria che finora non ha trovato riscontro in nessun progetto reale. Abbiamo visto che l'Agenzia Internazionale dell'Energia stima che i costi overnight degli SMR nell'Unione Europea siano attualmente intorno ai 10.000 dollari per kilowatt, contro i 6.600 dei reattori convenzionali, che già di per sé producono energia a costi tre o quattro volte superiori al fotovoltaico. E la parità di costo tra SMR e nucleare tradizionale, secondo lo scenario più ottimistico, non si raggiungerebbe prima della metà del secolo. Per dare un'idea concreta: uno studio sul caso italiano ha individuato come soglia di competitività per il nucleare un costo di impianto di 2.200 euro per kilowatt. Gli SMR ne costano almeno cinque volte tanto.

Il momento sbagliato per la scelta sbagliata

Ritengo che questo sia il momento sbagliato per avviare un programma nucleare in Italia. Non perché il nucleare sia intrinsecamente malvagio o perché non possa avere un ruolo in futuro, ma perché oggi le priorità sono altre, i costi non tornano e le alternative sono mature e disponibili.

Ogni euro investito nel nucleare è un euro sottratto alla costruzione delle infrastrutture che ci servono adesso: impianti fotovoltaici, parchi eolici, sistemi di accumulo su batteria, potenziamento e digitalizzazione della rete elettrica. Queste sono tecnologie che esistono, che funzionano, che costano meno ogni anno e che possono essere realizzate in tempi brevi. Un grande impianto fotovoltaico si

costruisce in uno o due anni; una centrale nucleare, nella migliore delle ipotesi, richiede un decennio tra progettazione, autorizzazioni e costruzione, e la storia insegna che i tempi reali sono quasi sempre molto più lunghi.

C'è poi una considerazione che riguarda specificamente l'Italia. Il nostro Paese gode di un irraggiamento solare tra i più elevati d'Europa. Abbiamo un vantaggio naturale che altri Paesi ci invidiano, e sarebbe irragionevole non sfruttarlo fino in fondo. Investire massicciamente nel solare, nell'eolico, nelle reti intelligenti e negli accumuli non è solo la scelta economicamente più sensata: è anche quella più rapida, più sicura e più compatibile con la struttura del nostro territorio e della nostra società.

Il nucleare di quarta generazione merita attenzione e finanziamenti per la ricerca di base. Se un giorno i reattori al Torio o a neutroni veloci diventeranno davvero sicuri, economici e capaci di risolvere il problema delle scorie, sarà giusto riconsiderare la questione. Ma quel giorno non è oggi, e prendere decisioni irreversibili, e costosissime, sulla base di tecnologie che esistono solo sulla carta, o al più come prototipi sperimentali, non è lungimiranza: è azzardo, tenendo conto che un reattore potrebbe durare una cinquantina d'anni.

Adesso è il momento di costruire le infrastrutture necessarie per sfruttare al massimo il solare. Dobbiamo semplificare le procedure, costruire agenzie (comunali, regionali, statali, non importa) in grado di fornire ai cittadini impianti fotovoltaici funzionanti chiavi in mano, scegliendo le ditte che dovranno realizzare gli impianti tramite appalti centralizzati. Bisogna contemporaneamente adeguare la rete, gli accumulatori di energia, le interconnessioni. È qui che dovremmo concentrare le nostre energie, questa è la vera sfida per il futuro.