

7.

Tecnologia nucleare: analisi e questioni attuali

INTRODUZIONE

Lo sviluppo e la diffusione della tecnologia nucleare sono inevitabilmente legate alle principali politiche governative ed energetiche di una nazione.^{1,2,3} Per facilitare le soluzioni tecnologiche proposte – e realizzarle – sono necessarie azioni urgenti, riconsiderazioni e riorientamenti che vadano oltre

¹ COP28, 2023, World Climate Action Summit of the 28th Conference of the Parties to the U.N. Framework Convention on Climate Change, Declaration to Triple Nuclear Energy, 2 December (accessed at www.energy.gov/articles/cop28-countries-launch-declaration-triple-nuclear-energy-capacity-2050-recognizing-key).

² IAEA Nuclear Energy Summit, Brussels Declaration, 2024, March (accessed at www.iaea.org/newscenter/news/a-turning-point-first-ever-nuclear-energy-summit-concludes-in-brussels and www.ans.org/news/article-5892/nuclear-energy-declaration-adopted-at-brussels-summit/).

³ OECD-NEA Role of Economics in SMR progress, Workshop, Ottawa, February 2024 (accessed at www.oecd-neo.org/jcms/pl_91685/the-role-of-economics-in-smr-progress-and-deployment).

l'affidamento alle sole forze del mercato, per evitare progetti isolati e destinati al fallimento. Se si guarda alla storia industriale della tecnologia nucleare, è indubbio che l'elevato costo del capitale iniziale necessario ne abbia rallentato lo sviluppo, ma è anche vero che ciò che ha fermato alcuni progetti sono stati gli alti costi di funzionamento e di manutenzione: il nucleare per il trasporto commerciale, i vecchi reattori a gas ad alta temperatura (HTGR) e i reattori veloci al sodio (SFR) sono un esempio lampante. D'altra parte, a livello politico, fiscale e internazionale, per i sistemi di energia nucleare sono necessari tempi e obiettivi specifici e fattibili, seppur ambiziosi, al fine di ridurre il rischio finanziario e di capitale, in modo da raggiungere l'obiettivo generale di un aumento degli ordini e della distribuzione.

Oggi, sono numerosi i progetti che cercano investimenti governativi e/o imprenditoriali per il loro sviluppo, ma che si assumono i rischi del First-Of-A-Kind (FOAK). I dati sui costi raccolti per 50 diversi tipi di reattori e 11 studi dimostrano che le stime dei costi del capitale *overnight* variano di un fattore da due a quattro, ma «non considerano la durata della costruzione e il finanziamento che sarebbero inclusi nel costo totale dell'impianto».⁴ È indiscutibile che lo sviluppo e la costruzione di qualsiasi nuovo design di reattore (per esempio i reattori raffreddati a metallo liquido) richiedano tempi lunghi, importi elevati e incertezza sull'esito, il che spiega i recenti tentativi di snellire la tecnologia, ridurre al minimo le costose attività di ricerca e sviluppo necessarie, e semplificare il *licensing*.⁵ Nella situazione attuale, allora, la questione diventa come garantire che la tecnologia esistente e conosciuta sia competitiva,⁶ dato che in linea di principio i progetti che richiedono meno lavoro sono quelli che possono essere rapidamente «provati» e procedere efficacemente nello sviluppo, mentre i reattori nuovi o innovativi sono esposti a maggiori rischi finanziari e di sviluppo. In particolare, l'analisi delle idee alla base dell'adozione di piccoli reattori ha portato ad affermazioni auto-evidenti, se si considerano gli aspetti legati alla domanda, all'offerta di energia e al suo uso, ma soprattutto le forze di mercato: «Le stime del ruolo dell'energia nucleare avanzata in questo mix dipendono fortemente dalle ipotesi [...]. Le ipotesi con il maggiore

⁴ A. Jaoude, L. M. Larsen, N. Guaita, I. Trivedi, F. Joseck, C. Lohgse, E. Hoffman, N. Stauff, K. Shirvan A. Stein, 2024, Meta analysis of advanced nuclear reactor cost estimations, INL RPT24-77048, US DoE, Idaho National Laboratory, March, p. 178.

⁵ NRC, 2023, Nuclear Regulatory Commission, Risk-Informed, Technology-Inclusive Regulatory Framework for Advanced Reactors, 10 CFR Part 53 Proposed rule, March (accessed at www.nrc.gov/reactors/new-reactors/advanced/modernizing/rulemaking-and-guidance/part-53 and Docket ID NRC-2019-0062).

⁶ Igor Pioro (Ed), 2023, Handbook of Generation IV Reactors, 2nd edition, Woodhead, ISBN 9780081001493, p. 940 (shop.elsevier.com/books/handbook-of-generation-iv-nuclear-reactors/pioro/978-0-12-820588-4).

impatto sulla diffusione del nucleare sono le politiche e i costi della tecnologia [...] la sfida economica che gli sviluppatori di reattori avanzati devono affrontare è scoraggiante».⁷

Studi recenti esortano addirittura a convertire centinaia di siti di centrali a carbone in chiusura o in esubero (a causa dell'invecchiamento e delle politiche nazionali a zero emissioni di carbonio) in piccole centrali nucleari, come mezzo per ridurre al minimo i disagi sociali ed economici locali.^{8,9}

Nell'attuale contesto dell'energia nucleare commerciale, lo scopo del presente documento è quello di alimentare il dibattito e fornire opinioni competenti sulle sfide e le soluzioni per lo sviluppo della tecnologia della fissione nucleare.

FATTORI ECONOMICI

Il fallimento dei reattori NuScale nel *Carbon Free Project* (CFP)^{10,11} è dovuto a un fatto semplice, ma apparentemente ignorato. Nonostante le sovvenzioni e i prestiti, risulta difficile realizzare più unità di reattore e il progetto NuScale combinava i rischi della costruzione civile di un reattore di grandi dimensioni (figura 1) con la mancanza di economia di scala per i reattori di piccole dimensioni (con un output di energia per reattore 10 volte inferiore), rendendo impossibile l'esecuzione del progetto, a meno che le linee di produzione NuScale non producessero centinaia di unità.

Tali difficoltà, pur essendo pronunciate nel caso del progetto NuScale, si manifestano anche in altri progetti di fornitori leader. Il progetto BWRX-300 pubblicizza un costo di 2.000 dollari/kW, che sembra difficile da raggiungere dal momento che l'ABWR, pur producendo una potenza 4,5 volte superiore e venendo costruito in un tempo record di 40 mesi sfruttando la vasta

⁷ NAS, 2023, National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2023, *Laying the Foundation for New and Advanced Nuclear Reactors in the United States*. Washington, DC: The National Academies Press, p. 300 ISBN 978-0-309-69077-5, doi: 10.17226/26630.

⁸ EPRI, 2023, *From Coal to Nuclear: A Practical Guide for Developing Nuclear Energy Facilities in Coal Plant Communities*, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA, Report 3002026517, October, p. 124.

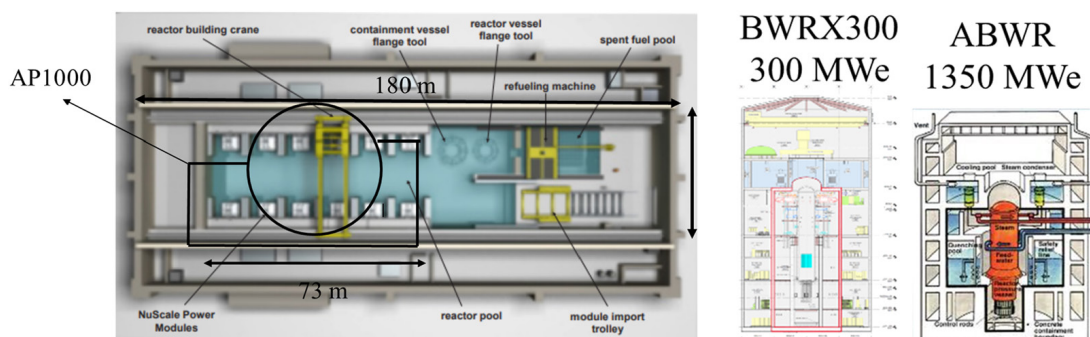
⁹ DOE, 2023, *Coal-to-Nuclear Transitions: an information guide*, US Dept of Energy, Office of Nuclear Energy, Washington, DC, March, p. 28 (accessed at www.energy.gov/ne/articles/coal-nuclear-transitions-information-guide).

¹⁰ D. Schlissel, 2023, *Eye popping new cost estimates released for NuScale SMR*, Institute for Energy Economics and Financial Analysis (accessed at ieefa.org/resources/eye-popping-new-cost-estimates-released-nuscale-small-modular-reactor/).

¹¹ Reuters, 2023, *NuScale ends Utah project in blow to US nuclear power ambition*, T. Gardner and M. Mishra, November 8, 2023 6:57 PM (accessed at www.reuters.com/business/energy/nuscale-power-uamps-agree-terminate-nuclear-project-2023-11-08/).

modularizzazione e l'esperienza, non ha mai raggiunto un costo inferiore a 3.000 dollari/kW in Giappone nel sito di Kashiwazaki-Kariwa.¹² Per i reattori di piccole dimensioni, la maggiore attrattiva era – ed è – rappresentata dalla minimizzazione dell'esposizione al rischio finanziario e da un più rapido recupero del capitale investito, e non dalle difficilmente sostenibili affermazioni riportate dalla National Academy of Science (NAS) degli Stati Uniti, secondo cui il costo del capitale *overnight* sarebbe inferiore del 50% (si veda nota 7, pag. 183): la realtà si è rivelata quattro volte superiore alle promesse iniziali – attualmente imputate all'aumento dell'inflazione e dei materiali – e non a possibili analisi errate, metodologie fuorvianti e margini inadeguati. Supporre che i piccoli reattori modulari come NuScale abbiano lo stesso costo operativo e di manutenzione (O&M) e del combustibile dei grandi reattori ad acqua è fuorviante. Per esempio, il progetto CFP era un greenfield e, a prescindere dalla semplificazione dei sistemi e dei componenti attuata nel progetto NuScale, è impossibile far funzionare sei reattori (6x77=462MWe) in un greenfield con lo stesso costo variabile di un sito con due reattori da 1250 MWe. Lo stesso vale per i micro-reattori da pochi MWe, dove ci si può permettere solo un operatore equivalente a tempo pieno (Full Time Equivalent, FTE), che tuttavia non può lavorare 24 ore su 24, 7 giorni su 7 e – contemporaneamente – fungere da responsabile di sicurezza/operatore/manutentore, ricevendo una paga minima per rendere la proposta “economica”. Questo spinge i micro-reattori verso applicazioni in reti elettriche, miniere, basi e comunità remote che sono più costose ma necessarie, pertanto avulse dalle giustificazioni legate al cambiamento climatico.

FIGURA 1 – Sovrapposizione delle dimensioni della struttura di sicurezza e sismica di un AP1000 rispetto all'edificio del reattore a 12 moduli NuScale¹³ (a sinistra). Confronto tra gli edifici dei reattori BWRX300 e ABWR (a destra)



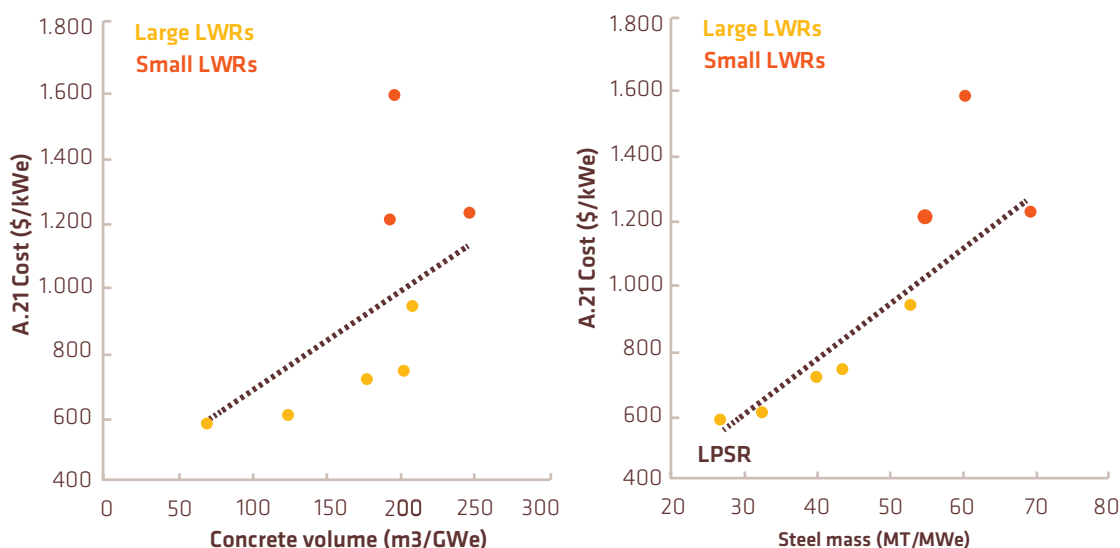
¹² Y. Matsuo and N. Hisanori, 2019, An analysis of the historical trends in nuclear power plant construction costs: The Japanese experience. *Energy Policy* Vol. 124, pp. 180-198 (<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.067>).

¹³ Le caratteristiche di progettazione NuScale di altre strutture di sicurezza e sismiche, compresi gli edifici di controllo e di gestione delle scorie, non sono mostrate.

Lo stesso Rapporto della NAS metteva in guardia dal rischio di fallimento (si veda nota 7, pag. 183): «La credibilità di un'opzione tecnologica è funzione di una valutazione rigorosa dei costi e dei mercati, dei dati storici di diffusione, della preparazione tecnologica, e dell'entità e dell'impatto delle incertezze. Da questo punto di vista, le tecnologie avanzate sono, per definizione, più rischiose di quelle consolidate».

La maggior parte dei costi delle centrali nucleari, grandi e piccole, sono uguali e noti (si veda nota 7, pag. 183). Le apparecchiature dell'*isola nucleare* rappresentano solo il 10-20% del costo totale dei grandi reattori, mentre la maggior parte dei costi è dovuta ai lavori di installazione e costruzione.¹⁴ Ciò significa che il costo Nth-of-a-kind (NOAK) per i reattori di grandi dimensioni si avvicina al costo delle apparecchiature dell'impianto, poiché la maggior parte dell'apprendimento e delle riduzioni dei costi si realizza attraverso la rapida esecuzione del progetto e la semplificazione della costruzione in loco. Quando si impiegano unità più piccole e/o a temperatura più elevata, le attrezzature dell'isola nucleare e le infrastrutture civili costituiscono una parte maggiore del costo totale, mettendo a rischio il potenziale NOAK dell'energia nucleare.

FIGURA 2 – Confronto tra costo e massa/volume di acciaio/calcestruzzo per potenza (valori assoluti)



¹⁴ R. Stewart and K. Shirvan, 2022. Capital Cost Evaluation of Advanced Water-Cooled Reactor Designs With Consideration of Uncertainty and Risk, ANP: Advanced Nuclear Power Program 194, Center for Advanced Nuclear Energy Systems. (Accessed at <https://canes.mit.edu/capital-cost-evaluation-advanced-water-cooled-reactor-designs-consideration-uncertainty-and-risk>).

Seppure non si conoscano tutti i motivi per cui questi costi siano così elevati per la tecnologia nucleare, si possono mettere a fuoco alcune questioni.

- 1) Tempi di costruzione eccessivi e grande impiego di acciaio, calcestruzzo, armature e ingegneria del taglio, anche nei moduli di fabbrica; i progetti proposti per i CGO vanno nella direzione opposta, come mostrato nella figura 2.
- 2) Mancanza di valorizzazione per la generazione del carico di base, che mette a dura prova qualsiasi fonte di energia elettrica ad alto investimento per la quale il recupero tempestivo del capitale è fondamentale per il settore privato. Da un lato, le centrali nucleari devono raggiungere elevati fattori di capacità per recuperare i costi e, dall'altro, il prodotto "24/7" viene continuamente svalutato in un mondo a basse emissioni di carbonio. In ogni caso, il raggiungimento di elevati fattori di capacità può essere ottenuto solo da tecnologie nucleari con una significativa esperienza pregressa: ciò è stato dimostrato, più e più volte, dai bassi fattori di capacità ottenuti da reattori veloci e ad alta temperatura.
- 3) Elevati tassi d'interesse e costi di finanziamento che richiedono una garanzia sul prezzo dell'energia o un accordo di acquisto per assicurare il ritorno sugli investimenti. Questo aspetto è visto come una barriera principale anche allo sviluppo di impianti solari termici non sovvenzionati o di progetti eolici offshore, poiché le tecnologie ad alto costo di investimento sono fortemente penalizzate nel mercato attuale.
- 4) Rapporti di sicurezza eccessivamente complessi e rischi per le licenze prolungate, a causa di norme, guide, regolamenti e leggi obsolete; per esempio – nonostante il funzionamento sicuro in Corea del Sud ed Emirati Arabi Uniti, e l'ottenimento della certificazione del progetto da parte della Nuclear Regulatory Commission (NRC) statunitense – il progetto dell'APR1400 per l'intero mercato dell'UE è stato drasticamente modificato con l'aggiunta del doppio contenimento e del *core catcher*.
- 5) Difficile competitività sul mercato rispetto al gas naturale e all'energia eolica e solare sovvenzionata, con indicazioni non dimostrate che i nuovi impianti possano in qualche modo sostituire le vecchie unità a carbone o quelle a chiusura forzata, contribuendo a mantenere le comunità da loro servite e riciclare parte del personale impiegato (si vedano le note 8 e 9), così da ottenere consenso a livello locale; in particolare, questi siti spesso corrispondono a regioni economicamente depresse di un Paese che non ha i mezzi per realizzare un mega-progetto multimiliardario come quello nucleare, senza garanzie complete e un'assicurazione del recupero totale del servizio dalle prestazioni di esecuzione del progetto.

- 6) Mancanza di una comprovata esperienza tecnologica e insufficiente profondità di competenze tecniche e di reale realizzazione dei progetti, che portano a un eccessivo ottimismo e a un marketing aggressivo, con generose affermazioni su costi, sicurezza, fattibilità, cicli del combustibile e riduzione dei rifiuti.
- 7) Numerose iniziative speculative, progetti e partnership alla ricerca di finanziamenti governativi e sostegno politico per ridurre i rischi e i costi del FOAK, e per perseguire meccanismi di finanziamento innovativi da parte di imprenditori ed enti speciali. Termini come SMR, Generazione IV o Reattori Avanzati sono in qualche modo impropri per le tecnologie tradizionali costruite a tavolino, come esemplificato dall'HTR-PM, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 1 a confronto con quelle di un EPR, che al momento ha realizzato un fattore di capacità dell'1% dalla connessione alla rete due anni fa. La stessa identica tecnologia in termini di componenti, layout, combustibili e funzionamento sta per essere costruita negli Stati Uniti per un'azienda chimica, dove l'affidabilità è la priorità assoluta, con la possibilità per la rete di acquistare l'energia generata in eccesso attraverso la modalità di funzionamento n+2. Altri esempi degni di nota sono quelli in cui approcci tradizionali, come l'HTR-PM, risalenti anch'essi a 50 anni fa, vengono portati avanti nonostante l'intenzione iniziale di innovare:
 - reattore a onde viaggianti in cui gli alti *burnup* sono raggiunti da una riproduzione profonda in un SFR da parte di Terrapower, dove dieci anni di sviluppo hanno portato al progetto Natrium che presenta un SFR convenzionale statunitense con lo stesso combustibile del reattore al sodio EBR-II che ha raggiunto la criticità nel 1965;
 - progettazione su scala commerciale (pochi MWe) di tubi di calore con combustibile metallico da parte di Oklo, dove 10 anni di sviluppo hanno portato al progetto attuale, identico a quello di EBR-II.

TABELLA 1 – Confronto tra "SMR avanzato di IV generazione" del reattore a gas ad alta temperatura (HTR-PM) e grande reattore ad acqua pressurizzata (EPR) costruiti in Cina

Fonte: elaborazione dell'autore

Caratteristiche del design	HTR-PM Baia di Shidao	EPR Taishan	Rapporto
Potenza termica (MWth)	2x250	4.590	9,0
Potenza elettrica (MWe)	210	1.770	8,4
Altezza dell'edificio (m)	65	~60	0,9
Altezza del vessel (m)	25	13	0,5
Diametro del vessel (m)	5,9	5,4	0,9
Tempo di costruzione (anno)	9	9	1,0
Costruzione modulare usata	No	No	1,0

- 8) Se da un lato i governi possono parzialmente finanziare l'elevato *capex* di una tecnologia nucleare, attraverso leggi, sussidi e garanzie di carico, dall'altro i costi di O&M e di combustibile devono essere mantenuti bassi. Gli alti costi di O&M sono stati storicamente la ragione principale della scomparsa dell'industria nucleare commerciale da parte di Stati Uniti, Germania e Giappone. La mancanza di penetrazione di reattori non raffreddati ad acqua ha portato al 97% di quota di mercato dominata dalla tecnologia di raffreddamento ad acqua. Quest'ultimo aspetto costringe sempre i progetti nucleari "reali" ad affidarsi ad approcci e tecnologie tradizionali già sperimentati e falliti, e si manifesta con standard ingegneristici conservativi e pratiche "collaudate".
- 9) L'adozione di soluzioni tecniche per i punti 1-8 di cui sopra è comunemente messa in discussione dalla realtà delle proiezioni della domanda del mercato energetico, che è ferma a un orizzonte di soli cinque anni, mentre le aziende devono congelare la progettazione e fermarsi per circa dieci anni in attesa della concessione di licenze, con il risultato che innanzitutto la progettazione risulterà definita sulla base di concetti obsoleti (come notato in precedenza) e, in secondo luogo, non avrà potuto soddisfare la domanda del mercato nei cinque anni di attesa. A ciò si aggiunge lo straordinario ritmo di sviluppo della tecnologia digitale, che genera innovazione continua e un sempre maggiore consumo energetico. Questo circolo vizioso è la realtà di oggi, e la ricerca e sviluppo di tecnologie nucleari per nuovi sistemi e componenti continua ad avere una durata media di 15-20 anni.

A questi ostacoli si aggiungono questioni sociali e politiche ben note:

- a) la paura dell'opinione pubblica per le radiazioni dovuta al possibile uso in ambito militare e la scarsa educazione sia alle scienze tecnologiche, ingegneristiche e matematiche (STEM) sia a quelle sociali;
- b) la mancanza di standard o processi di autorizzazione accettati a livello internazionale;
- c) le pressioni degli investitori e delle autorità di regolamentazione affinché le aziende/enti locali di produzione di energia mostrino rendimenti finanziari, in un orizzonte di breve periodo per generare consenso a favore dei policy maker;
- d) la continua mancanza di cooperazione strategica internazionale a lungo termine quando non è nell'interesse economico e politico nazionale.

SICUREZZA E RISCHIO NUCLEARE DOPO FUKUSHIMA

La sicurezza e ancor più il rischio di incidenti con emissione di radiazioni costituiscono il principale timore della maggior parte dell'opinione pubblica; pertanto (e giustamente) sono tenute in grande considerazione nelle attuali procedure di regolamentazione. Come tutti gli eventi di questo tipo accaduti nelle industrie ad alto rischio, la catastrofe di Fukushima è stata considerata da molti come "evitabile", ma solo a posteriori purtroppo, ovvero solo quando ci si è resi conto dell'inadeguatezza della protezione dallo tsunami: inadeguatezza che ha portato alla fusione ed esplosione di tre reattori in diretta sui media di tutto il mondo, con le inevitabili conseguenze geopolitiche, economiche e tecnologiche di ampia portata e durata.

In primo luogo, l'energia nucleare è stata immediatamente rivalutata in senso negativo. Ciò ha portato ai casi estremi del Giappone – con l'arresto immediato di tutta la produzione nucleare – ai rallentamenti dei programmi e alle chiusure degli impianti in Europa e ai rallentamenti delle nuove costruzioni negli Stati Uniti. Tutto ciò con la speranza (non comprovata) che l'eolico e il solare potessero fornire la maggior parte dell'energia elettrica, dando quindi la priorità alle sovvenzioni per questi investimenti con conseguenti costi energetici elevati, che hanno contribuito al trasferimento di importanti produzioni in Cina e all'import di ancor più necessaria energia dalla Russia. Si noti che in Giappone la produzione di energia elettrica è risultata insostenibile senza l'energia nucleare e, in pochi anni, è stato necessario riattivare il 25% dei reattori in funzione prima dell'evento di Fukushima – dopo loro revisioni e aggiornamenti – e un ulteriore 25% è in fase di riavvio.

Secondariamente, i due maggiori Paesi per popolazione – Cina e India – registrano un crescente bisogno di energia nucleare per il loro sviluppo economico sostenibile con inquinamento minimo dell'ambiente, il che spiega i corrispondenti investimenti nello sviluppo della capacità nucleare dei

rispettivi Paesi con progetti nazionali, nuovi concetti di reattore e costruzione di impianti. Di fatto, in questi Paesi sono in costruzione numerosi reattori nucleari di grandi dimensioni (accanto a circa 1GW(e) alla settimana di impianti a carbone supercritico ad alta efficienza).

In terzo luogo, la Russia ha continuato a seguire la propria strategia a due livelli: da un lato la creazione di poli energetici da fonte nucleare che circondano l'Europa (in Bielorussia, Turchia, Egitto e Ungheria), dall'altro il rafforzamento dei legami politici ed economici con Paesi come l'Egitto e la Turchia, il Bangladesh e alcuni Paesi del Sud-Est asiatico e dell'Africa per esportare la tecnologia (vedi anche sotto).

Inoltre, Stati Uniti, Canada, Corea del Sud, Taiwan, Regno Unito e Francia hanno sperimentato nuovi (ma deboli?) cambiamenti nell'opinione pubblica e re-indirizzamenti (di nuovo, deboli?) in un alquanto problematica politica energetica attuale e futura, con la conseguente strategia che sembra essere quella di mantenere una certa quota di energia nucleare (più alta in Francia che negli Stati Uniti) per la produzione di elettricità. Questo porta a dover ristrutturare o aggiornare le unità obsolete e, al contempo, incoraggiare nuove costruzioni, il tutto all'insegna del paradigma *zero carbon* e in conseguenza delle crescenti esigenze di indipendenza energetica (sempre più pressanti, data la situazione geopolitica e considerato l'aspetto altamente energivoro del digitale e dell'Intelligenza Artificiale).

Altresì, la strategia dei Paesi mediorientali consiste nell'investire l'enorme e incessante flusso di entrate petrolifere per avviare la costruzione di nuove centrali nucleari e per formare competenze interne volte a garantire la produzione di elettricità e la desalinizzazione di acqua pulita. Data la possibile riduzione delle riserve petrolifere, lo stato dei progetti è molto diverso negli Emirati Arabi Uniti (molto avanzato) rispetto all'Arabia Saudita (solo all'inizio), ma in generale la diversificazione energetica è in forte miglioramento.

Infine, ogni Paese ha un quadro o una motivazione diversa per l'azione o l'inazione nello sviluppo e implementazione della tecnologia nucleare e i rapporti annuali dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA) forniscono dettagli illuminanti. Per esempio, in Italia, Spagna, Belgio, Svizzera, Argentina, Brasile, Australia e Messico la tecnologia nucleare rimane in una situazione incerta a causa di fattori quali la motivazione politica, la crisi economica e la concorrenza di diverse fonti energetiche. I rimanenti Paesi industrializzati (Regno Unito, Cechia, Slovacchia, Romania, Bulgaria, Polonia, Ungheria e Canada) sembrano avere invece un'attitudine maggiormente proattiva verso l'energia nucleare, seppure ancora con sforzi limitati, che li porta a importare gran parte della tecnologia. Infine, i Paesi Emergenti quali Sudafrica, Nigeria, Ghana, Kenya, Marocco, Kazakistan, Filippine ecc. stanno seriamente valutando diverse opzioni tecnologiche nucleari per la produzione di energia e chiedono studi di fattibilità (compresa quella economica).

MATURITÀ TECNOLOGICA PER IDENTIFICARE E RIDURRE IL RISCHIO DI INVESTIMENTO, I COSTI E LA TEMPISTICA DEL PROGETTO

Nell'esame delle problematiche e delle soluzioni relative al rischio di investimento, è molto importante confrontare gli insegnamenti circa l'impatto della *relativa* maturità tecnologica sull'*effettiva* esperienza di implementazione tecnologica in altri settori. La necessità di esaminare e utilizzare gli insegnamenti tratti da altri settori è sottolineata nelle ultime dichiarazioni politiche dei Paesi OCSE (si veda nota 3).

Cosa si può imparare e utilizzare da esperienze in altri settori industriali, positive o negative che siano?

I maggiori costi di implementazione di una nuova tecnologia non sono affatto inaspettati, per cui si pongono naturalmente questioni di maturità tecnologica e rischi di implementazione. Il Rapporto britannico Atkins¹⁵ ha affermato che c'è «una grande incertezza per quanto riguarda l'economia dei reattori più piccoli. Tuttavia, si riconosce che l'SMR è una nuova tecnologia e c'è il rischio sostanziale che i costi siano più alti se si accumulano durante la fase di sviluppo o se i costi di finanziamento sono inizialmente più alti di quelli del "grande nucleare"». ¹⁶

L'introduzione di qualsiasi tecnologia nuova o diversa comporta il rischio di fallimento operativo e perdite finanziarie. Si può per esempio considerare l'analogia tra le imprese nucleari e minerarie, in relazione al problema di come basare le decisioni sul rischio relativo a un nuovo processo. Infatti, mentre è fondamentale ottenere un vantaggio competitivo (comunque definito in termini di prezzo, qualità, capacità...), il grado di rischio e di fallimento deve essere stimato. Per l'industria mineraria globale, massiccia e altamente competitiva, il rischio di perdita di produzione dovuto al cambiamento della tecnologia di lavorazione è stato affrontato direttamente e caratterizzato sistematicamente, utilizzando dati reali sui costi di produzione e sulla tempistica. Sono state quantificate le percentuali dinamiche relative di perdita o di riduzione della produzione o di ritardo equivalente del progetto, ottenendo

¹⁵ Atkins, 2016, SMR Techno-Economic Assessment Project 1: Comprehensive Analysis and Assessment Techno-Economic Assessment, Final Report, Volume 1, for The UK Department of Energy and Climate Change, (accessed at assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/).

¹⁶ EY – Parthenon (Ernst and Young), 2024, I. Taleb, J. Hadad, M. Milisavljevic, The true power of small modular reactors on the road to a sustainable energy future: Unveiling opportunities and challenges, Studio BMC, Paris, France, SCORE #EYG 002003-24Gbl, p. 44 (accessed at assets.ey.com/content/dam/ey-sites/ey-com/fr_fr/topics/energy/ey-parthenon-white-paper-smr-amr-20240319.pdf).

le cosiddette quattro “curve/serie di McNulty”,^{17,18,19} che sono considerate il “gold standard” per giudicare il rischio di una nuova tecnologia. Non sorprende il fatto che si tratti, in realtà, di curve di apprendimento tecnologico²⁰ e che la comunità degli investitori minerari ne abbia aggiunta una quinta, la cosiddetta “Curva del Promotore”, che però è eccessivamente ottimistica sia per quanto riguarda la produzione sia i tempi, e *non* si basa su alcun dato storico.²¹

Applicando per analogia il punto di vista e le conoscenze di questa grande industria alla tecnologia nucleare nei mercati competitivi dell'energia elettrica, possiamo far coincidere meglio gli obiettivi o le aspirazioni di produzione effettivi, con le aspettative concretamente realizzabili dei valori di progetto desiderati o pianificati. Si riportano di seguito le definizioni delle quattro serie di McNulty.

- *Serie 1* – Linea di base di produzione matura, collaudata, più veloce e migliore (= LWR e HWR di III generazione esistenti).
- *Serie 2* – Meno produzione perché si tratta di un prototipo e l'esperienza sul campo o i test sono limitati (= nuove varianti di progetti di LWR esistenti come EPR, AP1000, VVER1400 ecc.).
- *Serie 3* – Ancora più lenta e con poca esperienza di variabilità (= qualsiasi nuovo SMR raffreddato ad acqua, come AP300, BWRX-300, SMR160, o altri tipi di Gen IV).
- *Serie 4* – Lenta e con processi più complessi o nuovi, che sono in qualche modo pionieristici o non provati (= tutti gli altri tipi avanzati di SMR come i reattori a sali fusi, i reattori veloci, i reattori raffreddati a gas, i concetti di Gen IV, qualsiasi SMR ipotetico).

In maniera equivalente, è necessario valutare oggettivamente: ordine di grandezza di base e aspettative/obiettivi realistici per la tecnologia delle centrali nucleari.

¹⁷ T. P. McNulty, 1998, Developing innovative technology, *Mining Eng*, 50(10) pp. 50-55.

¹⁸ Canadian Institute of Mining (CIM), 2019, CIM estimation of mineral resources and mineral reserves best practices guidelines, Westmount, Quebec, Canada, November, p. 74 (accessed 2024 at mrmr.cim.org/media/1146/cim-mrmr-bp-guidelines_2019_may2022.pdf).

¹⁹ N. O. Lotter, W. Baum, S. Reeves, C. Arrue, D. J. Bradshaw, 2018, The business value of best practice process mineralogy, *Minerals Eng.*, 116, pp. 226-238 doi.org/10.1016/j.mineng.2017.05.008.

²⁰ R. B. Duffey, 2020, Learning about Risk: Life, Death and Money, ISBN-13:9798630671134, Idaho, USA, p. 481.

²¹ W. Flannery, 2016, A Banker's Perspective on Feasibility, Institute Canadien des Mines, de la Metallurgie et du Pétrole (CIM ICM), Toronto, Canada (accessed at www.cimmes.org/wp-content/uploads/2016/05/4-A-Banker's-Perspective-on-Feasibility-Warren-Flannery.pdf).

TABELLA 2 – Classificazione in serie McNulty della maturità tecnologica nucleare relativa, degli aumenti frazionali dei costi di progetto effettivi e dichiarati, e durate di progetto/sviluppo

Fonte: dati pubblicati e in Reuters (2023, nota 11), NuScale (2024)²² e Oettingnen (2021)²³

Project/ #units	Location	Cost x	Duration (years)	Series #
Existing designs		Actual	Actual	
Barakah 4	UAE	1,5	8	1
Akkuyu 4	Turkey	1,2	8	1
Kudankulam1&2	India	1,7	15	1
Shin-Kori 3&4	S Korea	1,2	10	1
Shin-Hanul 3&4	S Korea	1,5	12	1
New variants				
Sanmen 1&2*	China	1,3	9	2
Fangchenggang 3&4	China	2,0	8	2
Flamanville 3*	France	3,8	8	2
Olkiluoto 1	Finland	4,0	18	2
Vogtle 3&4	USA	2,5	10	2
Hinkley C 1	UK	2,0	10+	2
SMR concepts		Claim (NOAK)	Claim/Actual	
AC100 /1	China	?	6+(FOAK)	3
KLT 40S/2	Russia	4,0	3/6	3
NuScale /4+	USA	1,0	4/10+	3
SMR 160/300/ 1	USA	0,5	4	3
AP300 /1	USA	0,3	5	3
BWRX 300 /25+	USA	0,5	3-5	3
ARC-100	Canada	0,5	9(FOAK)	4
HTR-PM /2	China	?	9	4
BREST-OD-300	Russia	?	10+	4
Carem /1	Argentina	6 (DOAK)	20+	4
AHWR /1	India	?	20+	4
SM R 150** /5+	USA	0,5	9(FOAK) 4(NOAK)	4
Natrium /5+	USA	?	6(FOAK) 10(NOAK)	4
I MSR400 /1	USA	?	20+	4

²² NuScale, 2024, Investor Presentations, February and March 2024, NuScale Power LLC, slide 11 (accessed May 16, 2024, at www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/investors/2023/investor-presentation.pdf).

²³ M. Oettingnen 2021, Costs and timeframes of construction of nuclear power plants carried out by potential nuclear technology suppliers for Poland, Pulaski Policy Papers, Warsaw, Poland, ISSN 2080-8852, p. 11 (accessed at www.pulaski.pl).

La tabella 2 illustra la maturità relativa suggerita dall'assegnazione di progetti nucleari effettivi alla corrispondenza della serie McNulty di cui sopra, compresi i progetti First-of-Kind (FOAK) o Demonstration (DOAK) e qualsiasi finanziamento/sussidio non rilevato, ed è basata esclusivamente sui risultati *pubblicati* e sulle dichiarazioni disponibili al 2024 per i costi e la durata dei progetti. L'intervallo dei moltiplicatori di aumento dei costi noti (ovvero il rischio finanziario del progetto) mostra gli impatti del cambiamento tecnologico e sostiene chiaramente l'utilizzo della tecnologia esistente per quanto possibile. Le richieste della *Serie 4* sembrano corrispondere alla serie aggiuntiva di cui sopra, ovvero la "Curva del Promotore" di Flannery che – per definizione – presenta sempre un costo inferiore, una tempistica più rapida, una produzione più elevata e, quindi, una minore esposizione al rischio; si ricordi tuttavia che non è basata su alcun dato empirico.

RIDUZIONE DEI TEMPI DI COSTRUZIONE E DEI COSTI DELLE CENTRALI NUCLEARI

I recenti progetti di centrali nucleari sviluppati fuori dalla Cina (in Finlandia, Francia, Corea del Sud, Turchia e Stati Uniti) hanno sfiorato tempi e costi di costruzione di molti anni e di miliardi di euro/dollari. Di conseguenza, molte aziende fornitrici di tecnologia nucleare hanno affrontato difficoltà finanziarie a causa dell'incremento degli interessi su eventuali prestiti, dei costi aggiuntivi del lavoro (per i circa 3.000 lavoratori in un cantiere nucleare), delle clausole di penalità contrattuali e dei conseguenti problemi di flusso di cassa. Questo è un ulteriore rischio finanziario per gli investitori poiché, in assenza di sovvenzioni e portafogli richiesti, la "quota di mercato" nucleare è determinata dal vantaggio competitivo del costo di generazione (il differenziale) rispetto ad altre fonti locali (gas, carbone, petrolio) ed è esponenzialmente dipendente da esso, piuttosto che linearmente.

Tuttavia, perché la Cina può costruire la *Serie 2* nello stesso tempo della *Serie 1*? I fattori che contribuiscono a questa possibilità includono diversi impegni.

- Un grande piano nazionale di costruzione in corso (come era avvenuto in Giappone e Francia) costruendo più unità, avendo prima deliberatamente assimilato (o forse più propriamente "digerito") la tecnologia delle importazioni straniere, sviluppando e dispiegando simultaneamente i propri progetti.
- "Imparare facendo" con il controllo quasi totale sulla forza lavoro e sulla gestione del progetto, e con il controllo governativo (anche se a volte indiretto) del finanziamento, della costruzione e dei partner energetici.

- Processi di licenza relativamente rapidi una volta prese le decisioni di politica nazionale, e pianificazioni sulla sicurezza, la localizzazione e il finanziamento, soggetti a stretta supervisione.
- Capacità di progettazione e costruzione interne al Paese, con varie fabbriche per il combustibile, i componenti principali e i moduli degli impianti.

È improbabile che queste forze sociali e politiche possano essere tutte pienamente replicate al di fuori della Cina, dove il Governo controlla direttamente o indirettamente il programma nucleare con obiettivi fissati, forza lavoro e proprietà. Il modello più vicino è stato il programma di costruzione su larga scala in Francia, dove lo sviluppatore e tecnologo (CEA), il progettista e appaltatore (AREVA) e l'operatore della utility (EdF) erano e sono tutti di proprietà del Governo in una struttura integrata verticalmente e conforme alle richieste politiche.

Inoltre, a livello internazionale, i processi di licenza sono saldamente radicati nella tecnologia esistente dei reattori ad acqua e nelle pratiche passate. È quindi essenziale considerare i principali costi "neutrali" della tecnologia e della società, nonché gli obiettivi di sicurezza – elementi che evidentemente esulano dall'*isola nucleare* stessa – così come l'obiettivo nazionale e il ruolo del Governo.

Per la costruzione della *Serie 2*, la complessità può compensare gli incrementi progressivi di potenza progettati per ridurre i costi specifici di generazione (\$/MWh), pur mantenendo configurazioni collaudate e aggiungendo nuovi circuiti, cablaggi, scambiatori di calore e tubature a un layout esistente. La sfida consiste nell'evitare una gestione più complessa del progetto, della struttura di ripartizione dei compiti, del cantiere, della garanzia di qualità (Quality Assurance, QA), della forza lavoro e del calendario del progetto, che potrebbero contribuire a ritardi nei contratti di ingegneria *cost plus*.

Di seguito sono riportate alcune considerazioni a scopo di discussione, alcune più controverse di altre, con definizione degli obiettivi, degli impatti e delle conseguenti questioni che emergono.

I cosiddetti "progetti standard" sono stati costruiti e promossi per qualche tempo e sono rilevanti con riferimento ad alcune attuali offerte di grandi impianti e di cui si illustrano tre vantaggi noti.

- a) I costi e i tempi si riducono "replicando" i progetti e con il relativo apprendimento: dopo circa dieci unità identiche, si prevede tipicamente un calo del 10-20%. La costruzione in serie per più unità dovrebbe consentire la ripetizione di progettazione "computerizzata" e linee di costruzione di "moduli". L'obiettivo da porsi in tal senso è la necessità di avere ordini per più unità, similmente al modello di business degli aerei Boeing-Airbus, con sconti per ordini massivi e istituzione di linee di produzione di fabbrica.

- b) Le licenze sono nominalmente più rapide e semplici una volta che il progetto “di riferimento” è stato esaminato e approvato. Avere un processo di licenza combinato (COL) non sembra ridurre i tempi di licenza, poiché attualmente occorrono ancora cinque o più anni anche per progetti già autorizzati in altri Paesi (per esempio, l'ABWR o l'EPR), e alcune modifiche di progettazione sono inevitabili man mano che cambiano le conoscenze sui materiali, i clienti e la tecnologia. L'obiettivo è sviluppare un modello e strumenti per aggiornare e personalizzare continuamente il progetto di riferimento senza riavviare o aprire l'intero processo di progettazione e licenza.
- c) L'incertezza si riduce, soprattutto se è già stato impegnato un FOAK o qualche prototipo o Demonstrator (DOAK) e il concetto è stato “prova-to”, in modo che il rischio di finanziamento venga ridotto. L'obiettivo è una capacità prototipica sostenuta dal finanziamento nazionale – come avviene ora in Cina, India ecc. per dimostrare nuovi concetti di tecnologia, materiali e processi – e collaborare a livello internazionale sul dissegnamento e finanziamento delle unità FOAK o DOAK (per esempio, per le costruzioni di *Serie 3 e 4*, Gen IV SMR e altri progetti).

Considerando gli elementi di costo nella tabella 3, come si possono introdurre nuove tecnologie e minimizzare i rischi finanziari e di programmazione del progetto una volta noti?

Nell'industria dell'aviazione commerciale, questo problema viene affrontato costruendo e testando almeno un prototipo del nuovo aereo prima di avviare una linea di produzione completa e, contemporaneamente, sviluppando un “libro ordini” (a volte per centinaia di unità). Lo scopo è consentire un ritorno economico e prezzi equi, che – proprio come per la produzione di massa di automobili o farmaci – distribuisce su molte unità i costi iniziali di sviluppo, progettazione, allestimento della linea di produzione, regolamentazione e marketing.

In quella che viene chiamata la “curva di apprendimento tecnologico”, in genere, ci vogliono circa dieci unità costruite prima di riuscire a ridurre significativamente i costi iniziali e/o i tempi di produzione, e ciò anche dopo che un prototipo o FOAK è stato dimostrato e impegnato. Per l'AP1000 nel Regno Unito, si è affermato o stimato che è possibile ridurre del 20% circa il Costo Livellato dell'Elettricità per Unità (LUEC), costruendo solo cinque unità (vedi figura 1, punti quadrati etichettati AP1000).

In pratica, la maggiore modularizzazione – da sola – non riduce i costi complessivi (vedi figura 2 e tabella 1) e i costi di produzione sono significativamente più elevati per le prime unità (i costi di capitale rappresentano circa il 60% del costo totale finale di generazione di potenza, LUEC). I costi delle fabbriche e dell'esperienza sul campo devono essere “ammortizzati” o detratti

su un certo numero di costruzioni. L'unico modo per ridurre la penalità è accorciare i tempi di costruzione di una quantità adeguata; diversamente, le prime unità sarebbero maggiormente dispendiose.

TABELLA 3 – Contributi ai costi per la costruzione di una centrale nucleare²⁴

Fonte: elaborazione dell'autore

Costo capitale	Frazione relativa (%)	Note
1. Licenze COL, EIA e lavori in cantiere	5-10	3 anni +
2. Personale di ingegneria	5	Include design e CAD
3. Approvvigionamento	1	Documentazione, POs e QA
4. Forniture/Materiali	35-40	Attrezzature e moduli
5. Project Management	6	Circa 300 persone che supervisionano le 3.000 in turno
6. Costruzione/installazione	35-40	Programma di costruzione in loco
7. Carburante (prima carica)	1	Design specifico
8. Contingenza	1+	Margini di incertezza nelle stime per 2,4 e 6
9. Profitto/Margine	3-5+	Dipendente dal business case
10. Costi del proprietario	N/A	Specifico del sito, pochi \$100M
11. Interessi durante la costruzione (IDC)		Dipende da DR ROI e rapporto prestito/equity
12. Guadagno di produzione di massa	Da -10 a -20	Dopo FOAK e prime 10+unità

Nonostante ciò, per gli Stati Uniti è riconosciuto come necessario un «libro ordini “impegnato”, per esempio contratti firmati per 5-10 implementazioni di almeno un progetto di reattore per catalizzare il decollo commerciale», ma con solo $\pm 20\%$ di incertezza nei costi e nei tempi per i “reattori avanzati”,²⁵ ovvero costruzioni di tipo *Serie 2*. Inoltre, senza alcuna esperienza di costruzione, viene audacemente dichiarato dal Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti (DOE) che «gli SMR possono fornire maggiore certezza di raggiungere un obiettivo di costo previsto»²⁵ nonostante l'esperienza effettiva (si vedano le note 4, 10, 11 e la tabella 2). Questi “percorsi” non hanno ancora i necessari impegni commerciali e sul mercato dell'energia di scala adeguata, senza garanzie di finanziamento da parte del Governo, crediti di produzione, compensazioni *zero carbon* e sussidi a basso tasso di interesse.

²⁴ Si tratta dei costi di costruzione per il progetto effettivo escludendo la fase di sviluppo. I dati sono arrotondati per cui il totale non è esattamente 100%.

²⁵ DOE, 2023, Pathways to commercial liftoff: advanced nuclear, Publication vPUB-0329, Washington DC, p. 55 (accessed at [liftoff.energy.gov/wp-content/uploads/2023/03/20230320-Liftoff-Advanced-Nuclear-vPUB-0329-Update.pdf](https://www.energy.gov/wp-content/uploads/2023/03/20230320-Liftoff-Advanced-Nuclear-vPUB-0329-Update.pdf)).

La modularizzazione è anche pensata per accelerare la costruzione e, a causa degli interessi maturati (IDC), si crea una relazione lineare tra il costo e il tempo di costruzione, quindi qualsiasi cambiamento o ritardo comporta una variazione proporzionale nel LUEC. Pertanto, riducendo il tempo di costruzione in loco da 72 a 36 mesi il LUEC si diminuisce quasi del 50%.

APPROCCI ALTERNATIVI PER RIDURRE IL RISCHIO E AUMENTARE L'EFFICIENZA DELLA LICENZA/COSTRUZIONE

Sulla base delle analisi svolte è possibile definire futuri percorsi, necessari per rispondere alle sfide discusse finora. Forse le grandi unità (da 1400 a 1800MWe) sono semplicemente troppo difficili ed economicamente rischiose da costruire in modo tempestivo e quindi per alcuni costituiscono un'eccessiva esposizione al rischio finanziario.²⁶ Per compensare il rischio e i requisiti di capitale del libero mercato c'è bisogno di un prestito o una garanzia dal Governo, oltre a un accordo di acquisto di energia (PPA) per circa 20 anni a tassi molto elevati per i consumatori, come utilizzato nel Regno Unito e in Turchia. La tradizionale riduzione del costo livellato dell'elettricità (LUEC) con l'aumentare delle dimensioni dell'unità è ancora valida in linea di principio, ma l'esposizione al capitale aumenta. Anche le unità esistenti necessitano di una sovvenzione legislativa o di compensazioni di qualche tipo (per esempio, dai crediti per le emissioni di carbonio) per poter competere con le unità a gas naturale. Questo credito o sovvenzione è stato offerto solo per i nuovi impianti nelle ultime normative proposte e nelle dichiarazioni COP riguardanti le emissioni delle centrali elettriche e le riduzioni dei combustibili a base di carbonio (si veda nota 12). Ecco allora un elenco di sette possibili approcci alternativi, che sono stati presentati in vari progetti, con relative discussioni.

1) La riduzione delle scale temporali riduce il rischio per il rilascio delle licenze, la selezione del sito e la revisione.

I vari passaggi procedurali, legali, normativi e aziendali che precedono la definizione di un contratto per la costruzione di una centrale nucleare sono molto poco attraenti rispetto all'iter preliminare alla creazione di un'unità a turbina a gas a ciclo combinato (CCGT), che può essere impegnata, costruita e resa operativa in 36 mesi (se non meno). A causa dei ritardi nelle licenze e negli ordini successivi all'incidente di Three Mile Island, un processo di Licenza combinata di Costruzione e Operazione

²⁶ Georgia Public Service Commission, 2021, In the matter of: Georgia Power Company's twenty-fifth semi-annual Vogtle construction monitoring ("vcm") report, Docket # 29849, Testimony of Donald N. Grace, December, p. 22 (accessed at psc.ga.gov/search/facts-docket/?docketId=2984, Georgia Power Company's Vogtle Units 3 and 4 Construction Monitoring).

(COL) è stato sviluppato dalla NRC degli Stati Uniti con il regolamento 10 CFR Part 52, secondo il quale un impianto “standard” (certificato) può essere pre-approvato per un permesso di sito anticipato soggetto a successiva verifica (i cosiddetti criteri di test e accettazione intermedi o ITAACS). Tuttavia, la concessione di una licenza per un progetto di impianto per gli Stati Uniti già approvato – e forse già costruito altrove – può ancora richiedere tempi lunghi per essere certificata prima di poter arrivare a questo processo. Per far fronte a tali problemi, oggi sono in atto interventi legislativi volti a ridurli notevolmente (con la necessaria attenzione a continuare a garantire la sicurezza), verso una *technology-inclusive regulatory framework* che utilizzi metodi di valutazione flessibili e applicabili a diverse tecnologie di reattore nucleare.

Sebbene a nessun impianto sia stata effettivamente rifiutata la licenza, i processi di revisione formale hanno sollevato molte questioni da parte della NRC e di altri Enti regolatori nel Regno Unito, in Giappone, nell'UE e in Finlandia. Gli elementi in questione includono:

- il grado di proprietà straniera consentito e i layout del cablaggio dei sistemi di controllo e sicurezza (EPR);
- il livello di dettaglio del design e del layout necessario prima del design finale effettivo (ESBWR);
- la completezza e il livello di dettaglio della valutazione probabilistica del rischio, PRA (ABWR);
- la potenziale situazione di dover cambiare regolamenti e standard per consentire progetti diversi (CANDU e NuScale);
- il grado di aggiornamento e robustezza necessario alla luce degli eventi di Fukushima Daiichi (PWR e ABWR).

Il costo per ottenere una licenza di costruzione va dai \$300M al \$1B ed è così elevato che è stato sovvenzionato al progettista/licenziante da un finanziamento speciale per assistenza alla licenza dai programmi di energia nucleare del DOE, il che in effetti significa che una parte del Governo sta pagando un'altra.

Sembrerebbe ragionevole considerare l'adozione dell'approccio di licenza standardizzato per gli aerei, dove viene emessa una “certificazione di tipo” valida a livello internazionale, che viene successivamente modificata da Bollettini, Allarmi e Avvisi dal/i produttore/i e dal Regolatore. Un obiettivo adeguato è quindi un processo concordato (internazionalmente), che duri circa 24 mesi per una nuova costruzione piuttosto che 60, nell'ipotesi che un processo di “certificazione di tipo” sia fattibile e venga adottato.

2) Ridurre il rischio iniziale e l'investimento di capitale iniziale per produrre un ritorno sull'investimento (ROI) più rapido.

Questo significa non solo ridurre quelli che sono essenzialmente i requisiti di design e licenza sovra-progettati, molti dei quali sono stati aggiunti nel corso degli anni, ma richiede una revisione radicale sia dei processi di licenza sia degli standard ingegneristici applicabili.

Inoltre, come notato dalla Task Force Fukushima della NRC,²⁷ l'attuale raccolta di requisiti di analisi della sicurezza e approcci «è in gran parte il prodotto della storia. È stata sviluppata per lo scopo della licenza dei reattori negli anni '60 e '70, e integrata quando necessario per affrontare eventi significativi o nuove problematiche. Questa evoluzione ha portato a un approccio normativo patchwork» ed è necessario muoversi verso «l'istituzione di un quadro normativo logico, sistematico e coerente per una protezione adeguata che bilanci appropriatamente la difesa in profondità e le considerazioni sul rischio». Questo percorso sta andando avanti con le nuove regole recentemente proposte, anche in ambito 10 CFR Part 52, e con gli imprescindibili obiettivi di essere informati sul rischio, neutrali dal punto di vista tecnologico e basati sulla performance (si veda nota 5), senza considerare i rischi per gli investitori.

Poiché gli IDC aggiunti dai problemi di licenza possono essere significativi, ottimizzare e ridurre l'incertezza dei costi e dei tempi del sistema è importante, soprattutto nei mercati energetici competitivi dove il nucleare deve competere con il gas e altre fonti potenzialmente a basso costo. La riduzione del costo di capitale necessaria per competere è un fattore quattro o cinque, e può essere raggiunta solo attraverso innovazioni radicali.

3) Accorciare i tempi di ingegneria e costruzione.

L'aspetto ingegneristico comprende tutti i dettagli necessari per la progettazione, il layout, il calendario delle attività e la sequenza di costruzione, e rappresenta un fattore di costo molto significativo (si vedano le voci da 2 a 6 della tabella 1). Sono necessari progressi tecnico-organizzativi per raggiungere gli obiettivi sfidanti di:

- 48 mesi o meno dal primo mattone al completamento;
- progetti che richiedano meno di pochi milioni di ore di ingegneria;
- personale del sito di costruzione che conti meno di 3.000 persone.

I contributi di miglioramento potrebbero derivare dalla semplificazione dei progetti per la loro "costruibilità", dall'implementazione di nuovi materiali e tecniche moderne di loro produzione (meno barre d'armatura e

²⁷C. Miller, A. Cabbage, D. Dorman, J. Grobe, G. Holahan, N. Sanfilippo, 2011, Recommendations for enhancing nuclear safety in the 21st century, Fukushima Task Force Review of Insights, NRC, Washington, DC, July, 96pp, NRC access # ML111861807.

cemento) e dall'integrazione di tecniche moderne di cablaggio e CAD/BIM nel programma di costruzione. Già l'introduzione dell'uso di gru di sollevamento pesante a carico singolo e tecniche di costruzione "a tetto aperto" hanno semplificato l'accesso e accelerato l'assemblaggio di elementi principali nell'edificio di contenimento. In linea di principio, come suggerito dai progetti russi, l'intera isola del reattore può essere letteralmente "spedita al sito". D'altro canto, richiedere meno personale e appaltatori in cantiere è una sfida, anche perché le competenze e i tecnici necessari sono in contratto con sub-appaltatori e spesso utilizzano termini e condizioni "a costo maggiorato".

4) Aggiungere in maniera flessibile piccoli incrementi di potenza come richiesto dalla domanda e consentito dal flusso di cassa piuttosto che impegnarsi solo in grandi unità.

Questa è l'idea dell'SMR o del "modulo", ma deve superare la penalità (dell'ordine del 30%) prodotta dal sovraccarico dei requisiti complessivi di sicurezza del sito, del personale e del sito stesso. Il modello di business è minimizzare, livellare o distribuire il costo iniziale delle "fabbriche" di moduli e delle licenze (circa 5 anni e oltre \$300M per progetto/unità).

5) Condivisione delle strutture comuni e delle infrastrutture del sito per promuovere fundamentalmente "parchi nucleari" o "centri energetici".

Questo non è un concetto nuovo, ma un approccio logico che consolida le competenze necessarie, l'idoneità del sito e la sicurezza appropriata, e i costi e i requisiti infrastrutturali necessari sono semplificati. In Meneley et al.²⁸ viene dichiarato che: «Un parco energetico integrato facilita il rispetto dei requisiti di sicurezza (salvaguardie) che il mondo giustamente richiede a questa tecnologia. Un tale parco non deve essere enorme; il suo requisito principale è che sia integrato senza movimento giustificabile di materiale fissile isolato attraverso il suo confine definito. [...] Questi impianti potrebbero servire come produttori di elettricità, idrogeno, calore di processo e combustibili fossili fabbricati come il metanolo. Le emissioni di gas serra da queste strutture potrebbero essere ridotte drasticamente». Questo tema viene riscoperto e reinventato di nuovo oggi.²⁹ Quale tipo o classe di reattore sarebbe più adatto a tali parchi è poi interamente specifico del sito e delle dimensioni del parco, e richiede ulteriori analisi. La valutazione del rischio è resa più complicata a causa delle potenziali interazioni tra unità e dei guasti di causa comune (CCF), specialmente

²⁸ D. A. Meneley, R.B. Duffey, D.R. Pendergast, 1999, CANDU co-generation opportunities, IAEA Technical Committee Meeting, Beijing, PRC, April pp. 20-23, 14.

²⁹ WNN, 2024, World Nuclear News, Norsk Kjekraft focuses on off-grid SMR projects, 17 May (accessed at www.world-nuclear-news.org/Articles/Norsk-Kjekraft-focuses-on-off-grid-SMR-projects).

per eventi naturali e minacce “esterne”, ma l’approccio complessivo evita l’eccessiva frammentazione di risorse preziose, consolida i piani di sicurezza e di emergenza, consente una maggiore integrazione delle capacità e riduce i costi del sito del proprietario.

6) Affrontare le principali preoccupazioni sociali eliminando a livello di design la fusione del nucleo ed evitando i requisiti di evacuazione di emergenza.

Tali eventualità non possono essere escluse, dovendo tenere in considerazione situazioni estreme come – per esempio – eventi anomali, guerra nucleare o un impatto di meteora, che comunque avrebbero anche enormi ripercussioni sociali aggiuntive. Tuttavia il pubblico accetta generalmente le assicurazioni di basso rischio dovuto a incidenti di reattori e nessuna fusione del nucleo è postulata come raggiungibile per alcuni nuovi progetti grazie a specifiche caratteristiche aggiuntive di design (si veda nota 6). Questo obiettivo è completamente in linea con gli obiettivi GIF e affronta inoltre i grandi impatti sociali e le preoccupazioni sollevate anche da incidenti nucleari minori, e ancor più da grandi incidenti che coinvolgono danni al nucleo e/o rilascio di radioattività. Ciò richiede un riallineamento sostanziale degli obiettivi di sicurezza e progettazione per nuove unità (perché una bassa frequenza di fusione del nucleo non è “accettabile”) – riducendo e accettando il rischio percepito – e necessita di una comunicazione e di un coinvolgimento pubblico efficaci, specialmente in quelle situazioni dove anche la parola “nucleare” rappresenta un anatema.

7) Implementare una nuova agenda nazionale e industriale di ricerca che affronti direttamente i nuovi requisiti nazionali e internazionali, riallineando gli sforzi esistenti e il pensiero tradizionale.

Questo potrebbe significare l’eliminazione di alcuni sforzi esistenti, ma ne richiederebbe anche di nuovi ad alto rischio, con un impegno a lungo termine per la ricerca innovativa e la distribuzione del prototipo FOAK.

PUNTARE SUL TRIPLO:

PERCHÉ LA TECNOLOGIA NUCLEARE È AL LIMITE?

Lo slancio per molte iniziative politiche e ambientali è ridurre “l'impronta di carbonio” dell'energia e le emissioni atmosferiche, per raggiungere gli obiettivi ideali di “carbonio netto zero” o “carbonio neutro” entro il 2050, in tempo per contrastare le proiezioni delle crescenti esigenze energetiche globali e degli usi economici^{30,31,32} (si veda anche la nota 16). Un margine positivo è l'avanzamento significativo della Dichiarazione Chiave di 23 Paesi alla COP 28 (si veda la nota 1) per triplicare la capacità nucleare entro il 2050, a supporto dell'obiettivo globale di “emissioni nette zero”. Attualmente, considerando circa 270 grandi reattori raffreddati ad acqua sui 450 totali globali – senza includere Cina (circa 70), India (circa 23) e Russia (circa 30) – questo audace impegno promette di aggiungere circa 1.000 nuove grandi unità (oppure di superare le 3.000 di tipo SMR), rimanendo però ancora lontani dal soddisfare le esigenze di crescita energetica globale e di riduzione delle emissioni ambientali³³ (si veda anche nota 32). Un raddoppio dell'impegno sarebbe altamente auspicabile e, sebbene non politicamente e socialmente raggiungibile nel breve termine, si tratta di un obiettivo aspirazionale pertinente.

CONCLUSIONI

Le riflessioni che seguono riportano valutazioni soggettive basate su giudizio ed esperienza, che – pur non necessariamente convalidate dai dati o da analisi finali – hanno l'obiettivo di supportare il dibattito sul nucleare.

Le sfide menzionate in questo capitolo possono avere poche (semplici) spiegazioni e origini:

³⁰ A. Stein, J. Messenger, S. Wang, J. Lloyd, J. McBride, R. Franovich, 2022, *Advancing nuclear energy: evaluating deployment, investment and impact in America's energy future*, Breakthrough Institute, Berkeley, CA, p. 155, July (accessed at thebreakthrough.org/articles/advancing-nuclear-energy-report).

³¹ X_Energy, 2023, *Beyond electricity: Nuclear energy's role in supporting industrial decarbonization and economic growth on Teesside and beyond*, X-energy UK Holdings, LLC, p. 17 (accessed at static1.squarespace.com/static/5e13e7e8e3a0d42924a7e3e9/t/65706c21444b0730f5fec7f8/1701867195576/beyondelectricityuk).

³² A. I. Miller and R. B. Duffey, 2009, *Sustainable supply of global energy needs and greenhouse gas reductions*, *Trans Can Soc Mech Eng.* 33(1), paper 09-CSME-06.

³³ NuScale, 2024, *Investor Presentations, February and March 2024*, NuScale Power LLC, slide 11 (accessed May 16, 2024, at www.nuscalepower.com/-/media/nuscale/pdf/investors/2023/investor-presentation.pdf).

- *uso militare e civile del nucleare*: questo è disconnesso dalla produzione di energia, ma non dalla politica internazionale e dalle trattative commerciali;
- *energia illimitata*: questo è un enorme vantaggio, se si guarda al potenziale di fornitura energetica inesauribile utilizzando il riciclo del torio e del plutonio;
- *incidenti*: la tecnologia nucleare non ne è immune, tuttavia le “conseguenze” sono principalmente economiche e le catastrofi reali sono spesso imputabili all'errore umano, sia per causa operativa sia di progettazione inadeguata;
- *radiazioni*: le persone accettano i rischi se non sono vicine alle fonti di rischio, ma la terminologia nucleare è afflitta da *becquerels*, *grays*, *roentgens*, *curies* e *sieverts* che non comunicano nulla, pertanto è necessaria una migliore e dettagliata spiegazione al pubblico;
- *rifiuti incontenibili*: i rifiuti nucleari sono in realtà una risorsa energetica piuttosto che un problema di un milione di anni, tanto che uranio e torio non dovrebbero mai essere “venduti”, ma concessi in leasing.

Le competenze acquisite dalla tecnologia nucleare negli ultimi decenni hanno portato alla progettazione sicura di grandi reattori. Ironia della sorte, una volta acquisite sufficienti competenze, cioè alla fine del secolo scorso, quelle stesse competenze rischiano di essere sepolte dalla polvere dell'oblio. A titolo di esempio, se si confrontano gli argomenti e la base di dati sulla termoidraulica nucleare e sui progetti di IV generazione trattati nei principali manuali pubblicati di recente³⁴ (si veda anche nota 6) – che hanno l'obiettivo di riassumere 40 anni di ricerca – si scopre che le conoscenze di base acquisite rischiano di scomparire, il che rappresenta uno dei motivi principali della loro stesura.³⁵

³⁴F. D'Auria and Y. Hassan(Ed) 2024, Handbook of thermal hydraulics in water cooled nuclear reactors, Woodhead, ISBN 9780323856089, (www.elsevier.com/books/handbook-on-thermal-hydraulics-in-water-cooled-nuclear-reactors/dauria/978-0-323-856089).

³⁵Si ringraziano i colleghi Koroush Shirvan (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA); Romney B. Duffey Idaho Falls, Idaho, (Stati Uniti); Francesco D'Auria (Università di Pisa, Italia), con i quali è stato sviluppato lo studio scientifico E. Zio, K. Shirvan, R. B. Duffey and F. D'Auria (2025), Nuclear power technology: an analysis and informed opinions, pubblicato su Frontiers of Nuclear Engineering 4:1501247. doi: 10.3389/fnuen.2025.1501247, dal quale gli spunti di questo testo prendono origine.

LE OPINIONI DEGLI ESPERTI

- Il costo maggiore dell'opzione nucleare rispetto alle energie alternative dovrebbe essere collegato all'evoluzione necessaria della civiltà umana e al beneficio dell'umanità a livello globale.
- Avere zero incidenti con rilascio significativo di radioattività quando migliaia di reattori sono in funzione è un'illusione. Una distribuzione sostenibile della tecnologia nucleare richiede un pubblico consapevole, che accetti le emergenze (rischio residuo) e soprattutto possa contare su governi in grado di gestire e pagare le conseguenze di tali emergenze.
- La valutazione indipendente o un principio di sicurezza del reattore nucleare è diventato una debolezza negli impianti attuali a causa della loro complessità e – per molti design – anche in conseguenza della loro immaturità e della riservatezza che porta a nascondere dati chiave e informazioni di progetto.
- Se si considerano i tempi di recupero del capitale investito, la tecnologia nucleare è incompatibile con gli orizzonti temporali tipici dei processi decisionali nelle democrazie, almeno in contesti caratterizzati da possibili discontinuità nelle scelte politiche pubbliche. Nello specifico, dal momento che il recupero avviene nei quattro o cinque mandati governativi successivi a quello che autorizza l'investimento, è possibile che sia proprio l'opposizione a beneficiarne.

GUARDANDO AL FUTURO

- Le applicazioni per la conquista dello Spazio e per il controllo dell'inquinamento dell'ambiente ampliano le prospettive per l'uso dell'energia nucleare, ma solo basandosi sulla conoscenza terrestre.
- Risorse limitate di uranio (qualunque siano) richiedono la considerazione delle tecnologie di riprocessamento, torio e plutonio (e rifiuti nucleari).
- L'aumento del numero e delle tipologie di progetto di reattori nucleari annuncia inevitabilmente fattispecie inattese di incidente: un singolo incidente catastrofico potrebbe spingere nell'abisso la tecnologia nucleare tutta.
- La flessibilità nelle regole di licenza viene perseguita per migliorare una competizione internazionale per la quota di mercato e per giustificare investimenti in ricerca finalizzati all'impiego di scienziati, piuttosto che ai bisogni delle persone.
- La comunicazione oggi sta oscurando e controllando il progresso tecnologico: guida il futuro della tecnologia nucleare verso successi tattici, ma getta un'ombra su strategie sostenibili (come proclamato alla COP28).
- La speranza e la raccomandazione sono di mantenere le competenze per la progettazione e l'operazione di grandi reattori: ciò garantisce (superando il problema della valutazione indipendente) una tecnologia robusta e affidabile pronta a incorporare SMR e micro-reattori, che sono più adatti dei grandi reattori per i bisogni di trasporto, produzione di idrogeno, desalinizzazione e necessità dell'industria chimica locale e dei data center.

Infine, si raccomanda – si – vivamente l'impiego della fissione nucleare per la produzione di energia ovunque nel mondo. I grandi reattori, ove possibile, dovrebbero contribuire alla sicurezza energetica, alla stabilità finanziaria e allo sviluppo tecnologico. I piccoli reattori possono contribuire in aree che impattano direttamente sulla riduzione dell'inquinamento come il trasporto navale, la produzione di idrogeno e l'alimentazione energetica delle aree remote.