



Nota per l'Indagine conoscitiva sul ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica e nel processo di decarbonizzazione

Camera dei Deputati, Commissioni VIII e X

Roma, 28 marzo 2024

Premessa

Com'è noto, l'Italia ha già effettuato due referendum consultivi sull'energia nucleare che hanno sancito la fuoriuscita da questa tecnologia col primo referendum del 1987. Col secondo referendum del 2011 si è cancellato il programma nucleare dell'epoca che prevedeva, tra le altre cose, la costruzione di quattro reattori EPR di tecnologia francese. La costruzione del primo e l'unico di questi reattori in Francia a Flamanville, iniziata nel 2007, è tuttora in corso e i suoi costi complessivi – oneri finanziari inclusi - hanno superato i 19 miliardi di euro rispetto ai 3 previsti. La vittoria antinucleare nel referendum del 2011 ha evitato all'Italia di imbarcarsi in un programma di costruzione di reattori di tecnologia francese che in Francia è risultata fallimentare dal punto di vista economico e industriale. L'obiettivo di triplicare la potenza nucleare entro il 2050, lanciato da una ventina di Paesi alla COP28 di Dubai a fine 2023 richiederebbe l'installazione di 40 GW all'anno di nuova potenza nucleare per i prossimi 25 anni¹, un obiettivo come vedremo assolutamente irrealistico. Si presentano, brevemente, qui di seguito alcuni dei temi legati alle tecnologie nucleari.

1. Il nucleare, una fonte energetica in declino

Guardando l'evoluzione delle tecnologie nucleari commercialmente disponibili, è facilmente dimostrabile come si tratti di una tecnologia sostanzialmente ferma nei Paesi occidentali. Come si vede in Figura 1 (in fondo al documento), il numero di reattori avviati è crollato ormai da vent'anni e in questi ultimi decenni una minima ripresa è legata soprattutto ai reattori costruiti in Cina. Data l'età media dei reattori commerciali attualmente operativi che è di 31,9 anni (marzo 2024), e lo stallo nella costruzione di nuovi reattori, la strategia dell'industria nucleare in Occidente si sta concentrando soprattutto nel prolungare la vita utile dei vecchi reattori, strategia peraltro non priva di rischi.

La quota di energia nucleare sul totale della produzione elettrica mondiale è scesa dal picco del 17% raggiunto nel 1996 a circa il 9,2% del 2022, come si vede in Figura 2. Va peraltro ricordato come, nei Paesi aderenti all'OCSE, gli investimenti pubblici in ricerca e sviluppo dal 2000 al 2022 siano stati di circa 102 miliardi di euro alle tecnologie di fissione e fusione nucleare, mentre a tutte le rinnovabili nello stesso periodo siano andati circa 62 miliardi (Fonte: elaborazione da IEA <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-technology-rdd-budgets-data-explorer>).

¹ David Appleyard, The true scale of nuclear ambition, Nuclear Engineering International (2023) <https://www.neimagazine.com/opinion/opinionthe-true-scale-of-nuclear-ambition-11229119/>

2. I costi del nuovo nucleare commercialmente disponibile

Le enormi difficoltà che hanno incontrato i due principali Paesi occidentali che posseggono la tecnologia nucleare – la Francia e gli Stati Uniti – hanno un riscontro anche nelle proiezioni dei costi delle tecnologie oggi commercialmente disponibili. Va qui ricordato che sia l'azienda proprietaria della tecnologia francese, Areva, che quella nippo-americana, la Toshiba-Westinghouse, sono fallite, rispettivamente nel 2016 e 2017, per i costi associati alla costruzione delle loro prime centrali di generazione III+: l'EPR in Finlandia, e l'AP-1000 negli USA.

La banca d'affari Lazard (non un'associazione ambientalista) pubblica periodicamente delle stime dei costi industriali attualizzati dell'elettricità dei futuri impianti per le diverse tecnologie, stime che sono un riferimento per gli investitori privati. Come si vede nella tabella in Figura 3 tratta dal rapporto del 2023² il costo minimo stimato per le tecnologie nucleari (stimati in 141 \$/MWh) è maggiore dei costi massimi sia per i sistemi solari fotovoltaici associati a batterie industriali, come per quelli eolici sia a terra che a mare accoppiati a batterie industriali.

Ma al di là delle stime, il "Contratto per differenza" relativo all'EPR in costruzione a Hinkley Point nel Regno Unito (UK) – contratto con cui la francese EDF si è impegnata alla realizzazione dei due reattori EPR - prevede un prezzo garantito per 35 anni per la futura elettricità del reattore, prezzo attualizzato in parte all'inflazione. Il prezzo attualizzato al 2023 era di 124 £/MWh (ca 145 €/MWh), pari al doppio rispetto all'eolico offshore in UK³. Questo meccanismo comunque non coprirà i maggior costi già accumulati dal progetto, che per il 60% dovranno essere coperti da EDF. Questo elemento, il maggior costo dell'elettricità prodotta dai nuovi impianti nucleari, è ovviamente importante in generale ed in particolare, in prospettiva, per la produzione di idrogeno (H₂) a basso contenuto di CO₂. Il costo industriale dell'H₂ dipende infatti da due fattori: il costo degli elettrolizzatori e il costo dell'elettricità. Un mix di solare ed eolico (a terra o a mare) sarà certamente a minor costo rispetto alla stima più ottimistica fatta per i nuovi futuribili impianti nucleari, che sono dunque fuori gioco per la produzione di idrogeno. Inoltre, il forte crollo dei costi delle batterie assieme alla continua discesa dei costi del solare fotovoltaico in particolare, consentiranno alle tecnologie rinnovabili "intermittenti" di poter erogare elettricità a costi contenuti anche nelle ore senza sole – come già accade – o senza vento. Va altresì ricordato che sono già commercialmente disponibili gli accumuli termici e termodinamici di lunga durata, che rendono ulteriormente programmabili eolico e fotovoltaico

3. L'EPR-1 è stato di fatto un fallimento: la Francia riprova con l'EPR-2

Il progetto dell'EPR, originariamente una iniziativa industriale franco-tedesca (Framatome e Siemens), era stato lanciato nel 1991. Oltre 30 anni dopo è sostanzialmente fallito sul piano economico e presenta anche delle criticità tecnologiche, come è emerso nel caso dell'incidente alla centrale EPR in Cina di Taishan⁴. Per ridurre i costi l'azienda EDF ha sviluppato una variante più semplice il progetto dell'EPR-2 e ha previsto la costruzione di sei reattori in Francia mentre, come già ricordato, l'unico EPR in costruzione a Flamanville non è ancora andato in linea. Stimato in tre miliardi di euro quando fu annunciato nel 2004, l'EPR di Flamanville avrebbe dovuto entrare in servizio inizialmente nel 2012, ma ripetute difficoltà

² Lazard, 2023 *Levelized Cost Of Energy+*, April 2023 <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>

³ Steve Thomas, Greenwich University (2024) *Nuclear power and net zero: Too little, too late, too expensive* (https://www.sgr.org.uk/resources/nuclear-power-and-net-zero-too-little-too-late-too-expensive#_edn10)

⁴ Bernard Laponche, fisico e già direttore dell'Agenzia francese per la gestione dell'energia, sull'incidente alla centrale di Taishan riporta le dichiarazioni dell'Agence pour la surete nucleaire (ASN) alla commissione su scienza e tecnologia del Parlamento francese, cfr par. 3.2 e 3.3 dell'articolo *La folie des grandeurs*, Journal de l'Énergie, 12 novembre 2021 (https://journaldelenergie.com/nucleaire/folie-grandeurs/#_ftn9)

hanno portato a molteplici ritardi e costi aggiuntivi per il progetto, rivalutato a 13,2 mld€ cui si aggiungono gli oneri finanziari per un totale superiore ai 19 mld€.

Non è semplice valutare i tempi di costruzione ed i costi dell'energia per gli EPR-2, dato che non ne esistono ancora e, la storia insegna, i costi finali dei progetti in campo nucleare sono sempre stati superiori e di molto a quelli dei progetti iniziali, cosa evidente sia nel caso dell'EPR che per il reattore nippo-americano AP1000.

Un'analisi critica delle stime dell'EDF sull'EPR-2 è stata recentemente condotta su commissione di Greenpeace Francia⁵, e riporta un costo stimato dell'elettricità futura tra i 135 e i 176€/MWh, un valore ben più alto dei 70 €/MWh presentati da EDF e più allineato con le stime di Lazard. Il settore nucleare francese è in forte crisi: i reattori esistenti vanno invecchiando e molti di questi presentano seri problemi di corrosione con conseguenti fermi impianto e riduzione della produzione, mentre la nuova tecnologia commerciale, non è mai decollata.

4. Il legame con il settore nucleare militare

La spinta francese al nucleare è legata sia al peso dell'industria nucleare civile, che cerca di mantenere il suo ruolo predominante nella produzione di elettricità, ma anche a quello degli interessi militari, come apertamente dichiarato dal Presidente Macron per la strategia francese⁶: "senza nucleare civile niente nucleare militare, senza nucleare militare niente nucleare civile". Anche la forte spinta al nucleare in UK ha un'origine militare, e cioè la Royal Navy, come dimostrato dalle ricerche dell'Università del Sussex. Per le potenze nucleari mantenere l'industria civile è essenziale per l'autonomia tecnologica e del ciclo del combustibile per i sottomarini e portaerei a propulsione nucleare⁷. Un altro aspetto di grande rilievo delle tecnologie nucleari è quello della proliferazione nucleare, ragione centrale dell'attenzione internazionale sul programma nucleare iraniano.

5. Small Nuclear Reactors: una chimera da decenni e la questione scorie nucleari

Se i costi del nucleare oggi commercialmente disponibile sono altissimi, la proposta di fare piccoli reattori modulari (SMR) per tagliare i costi – producendoli in serie – è un'opzione ad oggi del tutto indimostrata. Si tratterebbe di reattori più piccoli – generalmente si fa riferimento a taglie fino a 300 MW – e nella gran parte dei casi con tecnologia esistente. Dunque, per produrre la stessa quantità di energia di un EPR (1650 MW) bisognerebbe costruirne sei se non di più. E ci vorrebbero dunque sei procedure autorizzative e sei siti. Come ha raccontato il prof. G.B. Zorzoli, per moti decenni professore di Fisica dei reattori al Politecnico di Milano e tra i maggiori esperti in campo energetico in Italia, gli SMR furono già presi in considerazione in Italia nel corso degli anni '80⁸. In esercizio al momento solo tre impianti, di cui uno senza produzione di elettricità, mentre quello russo è l'assai discusso, perché installato su una piattaforma galleggiante (il terzo è cinese). E si tratta di una linea di sviluppo già avviata nel secolo scorso. L'alleanza europea per gli SMR sta riscuotendo molte adesioni di operatori, ma al momento questo grande interesse non ha alcuna base concreta.

⁵<https://cdn.greenpeace.fr/site/uploads/2024/03/Rapport-Cout-du-nouveau-nucleaire-linsoutenable-legerete-dEDF-Greenpeace-2024-4.pdf>

⁶ J-M Bezat, Nucléaire: «Pour Emmanuel Macron, c'est la filière militaire qui prime», Le Monde 21 Dicembre 2020 https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/12/21/nucleaire-pour-emmanuel-macron-c-est-la-filiere-militaire-qui-prime_6064052_3232.html

⁷ Si veda Cox et al., *Understanding the Intensity of UK Policy Commitments to Nuclear Power*, [SWPS 2016-16](https://www.swps.org/publications/2016-16)

⁸ Intervista sul nucleare a GB Zorzoli, 24 novembre 2022.

<https://www.greenpeace.org/italy/rapporto/16739/gpnews147-intervista-al-professore-giovanni-battista-zorzoli/>

Un'analisi di quanti SMR occorrerebbero per diventare economicamente competitivi con il nucleare convenzionale, è dell'ordine di "almeno diverse centinaia se non qualche migliaio"⁹. E, ricordiamo, oggi (marzo 2024) abbiamo nel mondo 415 reattori commerciali in funzione.

Inoltre, la principale startup americana impegnata nello sviluppo degli SMR, non solo non è riuscita in 16 anni a costruire il primo prototipo, ma ha abbandonato il progetto e lo scorso novembre è stata chiamata in causa con una *class action* dagli investitori per dichiarazioni sociali false¹⁰

L'Accademia Nazionale delle Scienze degli Stati Uniti ha recentemente analizzato le diverse tipologie di SMR proposti e ha concluso che, in termini di produzione di rifiuti nucleari, i piccoli reattori ne produrrebbero da almeno il doppio a 30 volte¹¹.

Alle stesse conclusioni è arrivato un rapporto recente commissionato dall'Agenzia federale tedesca per la gestione dei rifiuti nucleari (BASE) secondo cui i possibili vantaggi di riduzione dei SMR – anche quelli di IV generazione - dei rifiuti ad alta attività si tradurrebbero in un aumento del volume di rifiuti a basse e media attività, mentre per portare la sicurezza dei progetti di SMR ai livelli dei reattori commerciali sono necessari ancora molti investimenti in ricerca e sviluppo¹²

6. Il nucleare di IV generazione

Una breve storia delle diverse tecnologie del programma nucleare sulla Generation IV, lanciato nell'anno 2000, mostra come nessuna delle filiere su cui si è lavorato per 20 anni e oltre abbia raggiunto la maturità industriale. Fanno eccezione al momento i due primi reattori cinesi ad alta temperatura e raffreddati a gas a pebble bed (HTR-PM), ed entrati in operazione all'inizio del 2022. I reattori raffreddati a piombo-bismuto di cui si parla in Italia, oltre alla relativa scarsità del bismuto presentano diversi problemi irrisolti:¹³

- il piombo e il piombo-bismuto, essendo molto densi, aumentano il peso della struttura, richiedono quindi maggiore supporto strutturale e protezione sismica, che aumentano i costi dell'impianto;
- mentre il piombo è abbondante e a buon mercato, il bismuto è raro e costoso e un LFR richiederà centinaia di tonnellate di bismuto;
- la soluzione piombo-bismuto è solida solo sotto 123,5 °C, va quindi riscaldata dall'esterno ogni volta che il reattore è fermato, perché solidificandosi può danneggiare il sistema;
- la soluzione piombo-bismuto produce una considerevole quantità di polonio, un elemento altamente radioattivo e molto mobile: ciò può complicare la manutenzione e porre problemi di contaminazione dell'impianto.

7. La fusione nucleare

Il progetto tecnologicamente e scientificamente più rilevante a livello globale è quello di Iter, il reattore sperimentale in costruzione in Francia, cui partecipa anche l'Italia in un'ampia

⁹ Arjun Makhijani, M.V. Ramana, *Can small modular reactors help mitigate climate change?*, The Bulletin of Atomic Scientists, July 21, 2022. <https://thebulletin.org/premium/2021-07/can-small-modular-reactors-help-mitigate-climate-change/>

¹⁰ S. Wolfe, *Investors file lawsuit against NuScale after cancellation of SMR project*, Power Engineering 24.11.2023 <https://www.power-eng.com/nuclear/reactors/investors-file-lawsuit-against-nuscale-after-cancellation-of-smr-project/#gref>

¹¹ Krall et al., *Nuclear waste from small modular reactors*, PNAS May 31, 2022 <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.2111833119>

¹² BASE, 2024 (in Tedesco) Analyse und Bewertung des Entwicklungsstands, der Sicherheit und des regulatorischen Rahmens für sogenannte neuartige Reaktorkonzepte https://www.base.bund.de/SharedDocs/Downloads/BASE/DE/fachinfo/fa/Abschlussbericht_neuartige_Reaktorkonzepte_2024.pdf?__blob=publicationFile&v=5

¹³ G.B. Zorzoli, *Nucleare di nuova generazione? Ci si lavora da 20 anni e non ci sono tempistiche*, Qualenergia, 6 settembre 2021 <https://www.qualenergia.it/articoli/nucleare-nuova-generazione-si-lavora-da-20-anni-non-ci-sono-tempistiche/>

cooperazione internazionale. Il progetto prevedeva inizialmente che la sperimentazione della fusione sarebbe stata effettuata dal 2025 per un decennio – ma è già stato annunciato un sostanzioso ritardo – periodo di test dopo il quale iniziare a progettare il prototipo industriale. La sua possibile commercializzazione, secondo l'ex direttore di Iter Bernard Bigot scomparso nel 2022, non sarà disponibile prima del 2060¹⁴.

Le reazioni di fusione su cui si lavora sono quelle Deuterio-Trizio, due isotopi dell'idrogeno. Se il primo elemento lo si può estrarre dal mare, il secondo – radioattivo con tempi di dimezzamento di una dozzina d'anni - non esiste in natura, se non in tracce, e viene prodotto solo nei reattori nucleari ad acqua pesante (CANDU). Questi nel mondo sono una ventina e di circa la metà è prevista in dismissione nei prossimi dieci anni.

La questione dell'effettiva disponibilità del Trizio come combustibile per la fusione è estremamente critica, come ha notato Daniel Clery sulla prestigiosa rivista Science¹⁵. Le quantità di Trizio attualmente disponibili ammontano a poche decine di kg nel mondo, sufficienti appena agli esperimenti di ITER. I fautori della fusione pensano di poter produrre il Trizio a partire da un isotopo del Litio ma che questa opzione sia fattibile è messo in discussione da alcuni ricercatori¹⁶.

L'ad dell'ENI Claudio Descalzi, dopo gli esperimenti del progetto del Commonwealth Fusion Systems (CFS) uno spin off del MIT, affermava che "si è testato il confinamento magnetico"¹⁷. Su questa interpretazione del significato dell'esperimento non è d'accordo il fisico Giuseppe Cima¹⁸ per il quale "l'esperimento in questione è stato invece un test di elettrotecnica, la prova di un prototipo di una bobina isolata, un dettaglio che in altri tempi la stampa avrebbe ignorato perché praticamente irrilevante per la fattibilità di un reattore a fusione".

Peraltro, è assai discutibile che la fusione sia "pulita": a parità di energia prodotta, infatti, rilascia molti più neutroni, i quali sin da subito renderanno le centinaia di migliaia di tonnellate di metallo dell'impianto radioattive, anche se con tempi di dimezzamento inferiori rispetto ai rifiuti nucleari da fissione.

Altri due progetti della "scienza ufficiale" hanno registrato qualche passo avanti. Il JET, inaugurato nel 1984, ha di recente raddoppiato la potenza di fusione già ottenuta nel 1997. Invece l'esperimento del Lawrence Livermore Laboratory, basato invece sulla tecnologia laser, per la prima volta ha ottenuto una reazione di fusione che ha prodotto – per una frazione di secondo – più energia di quella direttamente assorbita dalla capsula contenente Deuterio e Trizio (ma circa un centesimo di quella consumata dai 192 laser utilizzati nell'esperimento).

Un esperimento scientificamente rilevante, le cui applicazioni dirette riguardano però l'ambito militare per simulare test atomici; per le eventuali applicazioni di questa tecnologia alla produzione di energia ci vorranno molti decenni, come ha dichiarato Bon Rosner, già direttore dell'Argonne National Laboratory¹⁹.

Possiamo concludere con le parole dello stesso Rosner: "la fornace nel cielo ha un grande, grande vantaggio. Ha un modo di contenere e comprimere tutto, si chiama gravità. Ed è anche a buon mercato».

8. Il nucleare come obiettivo militare: la centrale di Zaporizhzhya

L'invasione russa dell'Ucraina ha evidenziato, per la prima volta in modo così evidente, uno degli altri rischi legati a questa tecnologia e cioè il suo essere un obiettivo militare strategico in caso di conflitto. Le operazioni militari russe attorno alla centrale di Zaporizhzhya, la più grande in Europa con sei reattori, il sequestro del personale ucraino della centrale e le continue

¹⁴ B. Bigot, 2018: <https://www.foronuclear.org/en/sector-values/featured-voices/bernard-bigot/>

¹⁵ D. Clery, *Out of Gas*, Science 23 June 2022, <https://www.science.org/content/article/fusion-power-may-run-fuel-even-gets-started>

¹⁶ M. A. Abdou et al., *Physics and technology considerations for the deuterium– tritium fuel cycle and conditions for tritium fuel self-sufficiency*, Nuclear Fusion 61, 13001 (2021).

¹⁷ <https://www.geopolitica.info/descalzi-fusione-confinamento-magnetico-energia-bassissimo-costo/>

¹⁸ <https://www.editorialedomani.it/ambiente/il-nucleare-pulito-non-esiste-ancora-la-fusione-non-ci-aiutera-per-la-transizione-verde-tsz4njb7>

¹⁹ J. Mecklin, *The Energy Department's fusion breakthrough: It's not really about generating electricity*, <https://thebulletin.org/2022/12/the-energy-departments-fusion-breakthrough-its-not-really-about-generating-electricity/>

interferenze sulle operazioni di gestione degli impianti, la ripetuta distruzione delle linee elettriche che alimentano la centrale, la distruzione della diga Nova Kakhovka nel giugno 2023, rappresentano eventi che hanno trasformato la centrale nucleare in un obiettivo militare e una minaccia nel caso che la dinamica bellica spinga le forze russe fuori dai territori illegalmente occupati. Greenpeace Germania ha commissionato un rapporto all'agenzia di Intelligence McKenzie²⁰ che, con l'analisi satellitare, ha dimostrato come la Russia abbia usato e utilizzi l'area della centrale come piattaforma di lancio dei suoi attacchi missilistici e di artiglieria, piattaforma che le forze ucraine non possono colpire proprio per i rischi associati alla presenza dei sei reattori nucleari e ai rischi associati.

Sul potenziale rischio che la centrale venga coinvolta dal conflitto militare, Greenpeace aveva presentato, sin dall'inizio del conflitto in Ucraina, un'analisi preliminare dei potenziali rilasci di radioattività di un ipotetico incidente la cui dinamica più probabile è simile a quella di Fukushima e cioè legata alla mancanza di elettricità per raffreddare i reattori. I potenziali rischi di un rilascio radiologico potrebbero essere simili, se non superiori, a quelli dell'incidente di Fukushima²¹.

In conclusione

Questa rapida e parziale rassegna delle questioni legate alle tecnologie nucleari mostra la totale inattendibilità di un ruolo significativo di questa fonte energetica nella transizione. Si tratta dell'unica tecnologia energetica i cui costi economici sono da decenni in crescita, mentre il settore delle rinnovabili, degli accumuli e delle tecnologie verdi è in continua discesa. La spinta a riportare l'Italia verso una irrealistica ripartenza del nucleare è anche di fonte francese, come del resto quella che portò al "memorandum of understanding" del 2009 siglato dai presidenti Berlusconi e Sarkozy per la costruzione di 4 EPR nel nostro Paese. Quella scelta fu saggiamente respinta a larghissima maggioranza dai cittadini italiani col referendum del 2011.

Ribadiamo in conclusione la nostra più ferma opposizione a qualunque ipotesi di rilancio del nucleare: nessuna delle tecnologie nucleari è pulita, nè è economica, continua a presentare diversi rischi e rappresenta una falsa soluzione per la transizione energetica²².

L'evoluzione nel settore delle rinnovabili e degli accumuli consente già oggi una transizione verso le emissioni zero a costi inferiori e tempi rapidi, cosa impossibile con il nucleare.

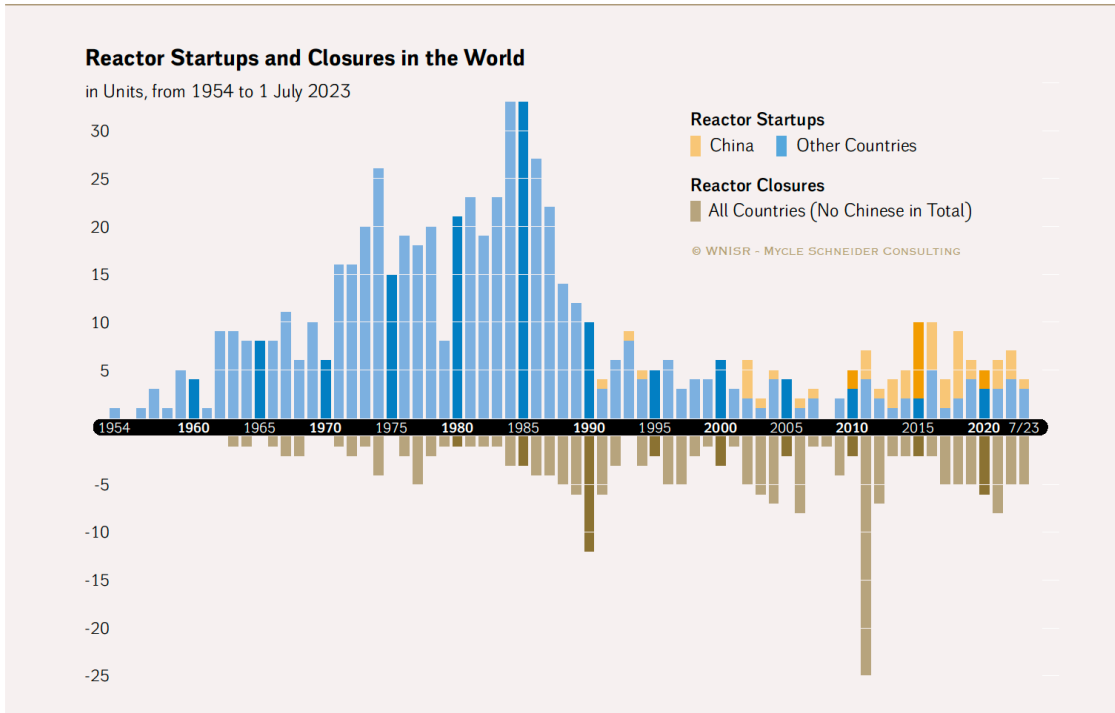
²⁰ McKenzie, *A Nuclear Power Plant As Launch Pad*, Report for >Greenpeace Germany, Hamburg September 2023 https://www.greenpeace.de/publikationen/McKenzie_Report_Zaporizhzhia.pdf

²¹ Greenpeace International, *The vulnerability of nuclear plants during military conflict*, Amsterdam 2 March 2022 <https://www.greenpeace.org/static/planet4-international-stateless/2022/03/6805cdd2-nuclear-power-plant-vulnerability-during-military-conflict-ukraine-technical-briefing.pdf>

²² Una sintesi della posizione generale di Greenpeace sul nucleare è disponibile sul nostro sito web <https://www.greenpeace.org/italy/cosa-facciamo/nucleare/>

Figura 1. Numero di reattori nucleari connessi alla rete e ritirati nel mondo dal 1954 al 2023. In azzurro e blu i reattori entrati in funzione ogni anno; in giallo quelli cinesi. In verde quelli chiusi ogni anno. Fonte: World Nuclear Industry Status Report, 2023

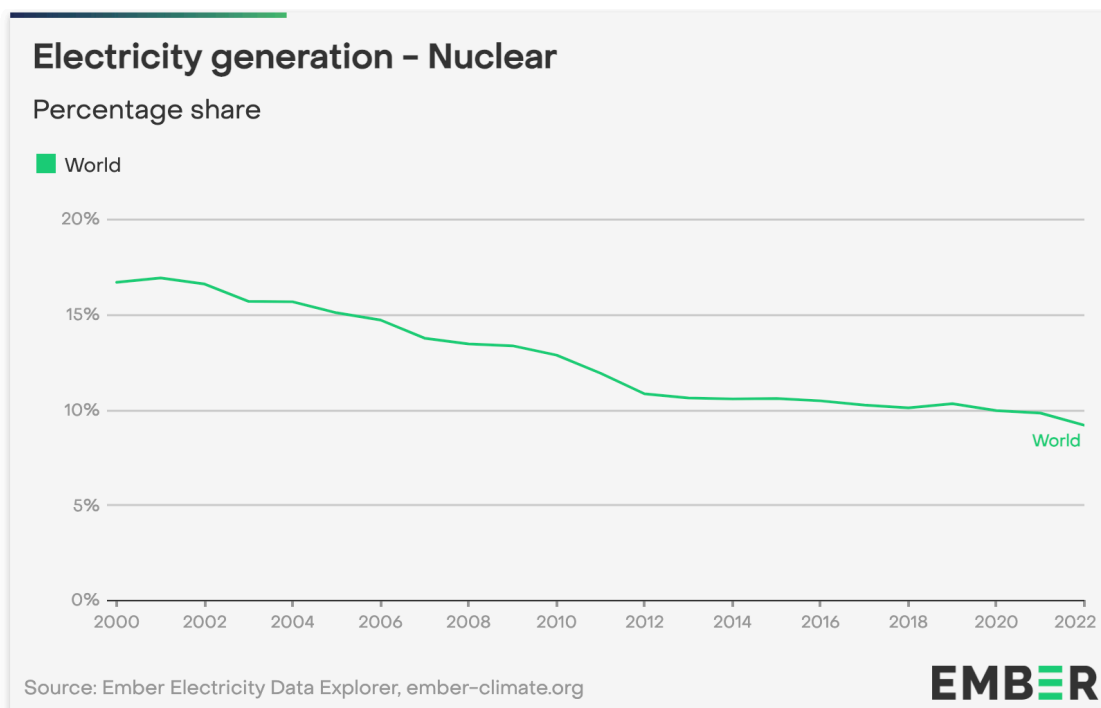
Figure 5 • Nuclear Power Reactor Grid Connections and Closures – The Continuing China Effect



Sources: WNISR, with IAEA-PRIS, 2023

Fonte: <https://www.worldnuclearreport.org/-World-Nuclear-Industry-Status-Report-2023-.html>

Figura 2. Quota percentuale della produzione elettrica globale coperta dal nucleare (2000-22)

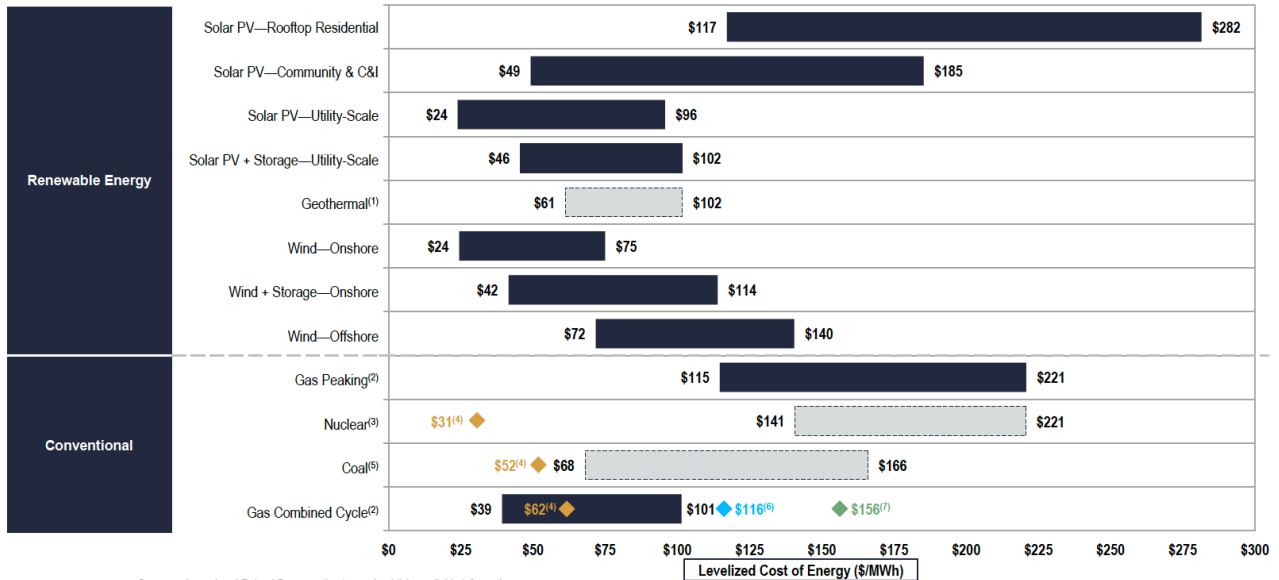


Fonte: <https://ember-climate.org/topics/nuclear/>

Figura 3. Stime dei costi attualizzati (senza sussidi) per diverse tecnologie energetiche (Fonte: Lazard, 2023)

Levelized Cost of Energy Comparison—Unsubsidized Analysis

Selected renewable energy generation technologies are cost-competitive with conventional generation technologies under certain circumstances



Source: Lazard and Roland Berger estimates and publicly available information.

Note: Here and throughout this presentation, unless otherwise indicated, the analysis assumes 60% debt at an 8% interest rate and 40% equity at a 12% cost. See page titled "Levelized Cost of Energy Comparison—Sensitivity to Cost of Capital" for cost of capital sensitivities.

- (1) Given the limited data set available for new-build geothermal projects, the LCOE presented herein represents Lazard's LCOE v15.0 results adjusted for inflation.
- (2) The fuel cost assumption for Lazard's unsubsidized analysis for gas-fired generation resources is \$3.45/MMBTU for year-over-year comparison purposes. See page titled "Levelized Cost of Energy Comparison—Sensitivity to Fuel Prices" for fuel price sensitivities.
- (3) Given the limited public and/or observable data set available for new-build nuclear projects and the emerging range of new nuclear generation strategies, the LCOE presented herein represents Lazard's LCOE v15.0 results adjusted for inflation (results are based on then-estimated costs of the Vogtle Plant and are U.S.-focused).
- (4) Represents the midpoint of the unsubsidized marginal cost of operating fully depreciated gas combined cycle, coal and nuclear facilities, inclusive of decommissioning costs for nuclear facilities. Analysis assumes that the salvage value for a decommissioned gas combined cycle or coal asset is equivalent to its decommissioning and site restoration costs. Inputs are derived from a benchmark of operating gas combined cycle, coal and nuclear assets across the U.S. Capacity factors, fuel, variable and fixed operating expenses are based on upper- and lower-quartile estimates derived from Lazard's research. See page titled "Levelized Cost of Energy Comparison—Renewable Energy versus Marginal Cost of Selected Existing Conventional Generation Technologies" for additional details.
- (5) Given the limited public and/or observable data set available for new-build coal projects, the LCOE presented herein represents Lazard's LCOE v15.0 results adjusted for inflation. High end incorporates 90% carbon capture and storage ("CCS"). Does not include cost of transportation and storage.
- (6) Represents the LCOE of the observed high case gas combined cycle inputs using a 20% blend of "Blue" hydrogen, (i.e., hydrogen produced from a steam-methane reformer, using natural gas as a feedstock, and sequestering the resulting CO₂ in a nearby saline aquifer). No plant modifications are assumed beyond a 2% adjustment to the plant's heat rate. The corresponding fuel cost is \$5.20/MMBTU, assuming ~\$1.40/kg for Blue hydrogen.
- (7) Represents the LCOE of the observed high case gas combined cycle inputs using a 20% blend of "Green" hydrogen, (i.e., hydrogen produced from an electrolyzer powered by a mix of wind and solar generation and stored in a nearby salt cavern). No plant modifications are assumed beyond a 2% adjustment to the plant's heat rate. The corresponding fuel cost is \$10.05/MMBTU, assuming ~\$4.15/kg for Green hydrogen.

LAZARD
Copyright 2023 Lazard

This study has been prepared by Lazard for general informational purposes only, and it is not intended to be, and should not be construed as, financial or other advice. No part of this material may be copied, photocopied or duplicated in any form by any means or redistributed without the prior consent of Lazard.

Fonte: <https://www.lazard.com/research-insights/2023-levelized-cost-of-energyplus/>