

Nucleare e transizione energetica europea:
il caso olandese tra adeguatezza di sistema,
regolazione del rischio e sostenibilità istituzionale*

Giovanni Toscano

SOMMARIO: 1. Continuità della disciplina primaria e governance del ciclo di vita nel modello nucleare olandese: stabilità normativa e riduzione del rischio regolatorio. – 2. Il nucleare nel sistema elettrico europeo: adeguatezza, sicurezza dell'approvvigionamento e programmabilità *low-carbon*. – 3. Sicurezza nucleare e regolazione multilivello del rischio: *defence in depth*, analisi probabilistica e principio di precauzione. – 4. Gestione del *back-end* e responsabilità intergenerazionale: il tempo lungo del nucleare tra diritto europeo e parametro costituzionale. – 5. Riflessioni conclusive: il perimetro di governabilità come criterio di sostenibilità istituzionale.

1. *Continuità della disciplina primaria e governance del ciclo di vita nel modello nucleare olandese: stabilità normativa e riduzione del rischio regolatorio*

La ricerca intende analizzare il modello nucleare dei Paesi Bassi quale paradigma di sostenibilità istituzionale nel settore atomico, evidenziando come la continuità della disciplina primaria, l'indipendenza regolatoria e la *governance* integrata del ciclo di vita costituiscano fattori decisivi per la riduzione del rischio regolatorio e la tenuta della scelta nucleare nel tempo lungo.

L'interesse per l'archetipo olandese, esaminato anche in relazione alla disciplina europea e, in chiave comparata, con il mo-

* Articolo sottoposto a referaggio.

dello “debole” italiano, non risiede nella dimensione quantitativa della produzione nucleare, relativamente contenuta nel contesto europeo, bensì nella qualità dell’architettura normativa e nella stabilità dell’ecosistema regolatorio. Il dato quantitativo, infatti, pur rilevante sotto il profilo industriale, non è decisivo ai fini della sostenibilità istituzionale dell’opzione atomica.

Ciò che rende il caso dei Paesi Bassi paradigmatico è la coerenza nel tempo della disciplina primaria e la capacità dell’ordinamento di mantenere allineate, per oltre sessant’anni, pianificazione energetica, regolazione tecnica e gestione del ciclo di vita.

La disciplina primaria è contenuta nella *Kernenergiewet* (*Nuclear Energy Act*) del 1963, configurata sin dall’origine come legge-quadro, e aggiornata in coerenza con l’evoluzione del diritto *EURATOM* e con gli standard internazionali IAEA¹. La permanenza della medesima legge-quadro per oltre mezzo secolo – pur attraverso revisioni e adeguamenti – rappresenta un elemento di straordinaria stabilità in un settore notoriamente esposto a oscillazioni politiche e a tensioni ideologiche.

Nel settore nucleare, infatti, il concetto di rischio regolatorio (*regulatory risk*) assume rilievo centrale. Esso designa l’incertezza derivante da possibili mutamenti legislativi o amministrativi suscettibili di incidere sulle condizioni economiche e operative dell’investimento².

Nel nucleare tale rischio è amplificato da tre caratteristiche strutturali:

- elevata intensità di capitale iniziale;
- tempi di realizzazione e messa in esercizio prolungati;
- necessità di ammortamento su orizzonti temporali pluridecennali.

¹ OECD-NEA, *Nuclear Legislation in OECD and NEA Countries - Netherlands*, Parigi, 2025, disponibile al seguente link: https://www.oecd-nea.org/upload/docs/application/pdf/2025-10/netherlands_2025.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

² Sulla nozione di *regulatory risk* in settori infrastrutturali ad alta intensità regolatoria, si v. OECD, *Regulatory Policy Outlook*, Parigi, 2021, disponibile al seguente link: https://www.oecd.org/content/dam/oecd/en/publications/reports/2021/10/oecd-regulatory-policy-outlook-2021_c5274577/38b0fdb1-en.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

L'instabilità normativa può compromettere la bancabilità del progetto, generare effetti distorsivi sulla pianificazione finanziaria e, in ultima analisi, incidere anche sulla sicurezza tecnica, poiché investimenti incerti riducono la capacità di programmare aggiornamenti, revisioni periodiche e interventi di miglioramento.

Il modello olandese mostra una significativa coerenza tra pianificazione energetica, regolazione tecnica e gestione del ciclo di vita. L'*Autoriteit Nucleaire Veiligheid en Stralingsbescherming* (ANVS) opera come autorità indipendente con funzioni di licensing, vigilanza ed enforcement, assicurando continuità e trasparenza nelle decisioni autorizzative³. L'indipendenza del regolatore non è qui un mero requisito formale: essa costituisce la condizione affinché la sicurezza sia sottratta a pressioni contingenti e garantita secondo criteri tecnici verificabili.

Elemento particolarmente rilevante è la gestione centralizzata del *back-end* attraverso COVRA (*Centrale Organisatie Voor Radioactief Afval*), responsabile del trattamento, dello stoccaggio e della pianificazione a lungo termine dei rifiuti radioattivi⁴. La centralizzazione produce effetti istituzionali significativi: concentrazione delle competenze specialistiche, standardizzazione delle procedure, tracciabilità dei materiali radioattivi e gestione finanziaria trasparente dei fondi dedicati. In questo senso, la gestione del *back-end* non è soltanto un segmento tecnico, ma una componente strutturale della sostenibilità istituzionale.

La pianificazione finanziaria del decommissioning e dello stoccaggio a lungo termine costituisce, a sua volta, un elemento cruciale. La Direttiva EURATOM del 2011 impone agli Stati membri di garantire la disponibilità di risorse adeguate per la gestione dei rifiuti radioattivi, evitando il trasferimento degli oneri alle generazioni future⁵.

³ Cfr. <https://english.autoriteitnvs.nl/anvs/duties-of-the-anvs> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026); Cfr. <https://www.ensreg.eu/country-profile/Netherlands> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

⁴ Cfr. https://www.oecd-neo.org/rwm/profiles/Netherlands_profile_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

⁵ Sul punto, si v. L. Colella, *Energia nucleare e transizione climatica in Francia. Brevi riflessioni in chiave europea e comparata*, in *Queste Istituzioni*, n. 2, 2023, pp. 30-53.

Nel modello olandese, la previsione di fondi dedicati e la gestione centralizzata riducono il rischio di “scarico intergenerazionale”, trasformando la responsabilità futura in impegno finanziario presente e contabilizzato.

Sotto il profilo comparato, l'esperienza italiana si caratterizza per una storia di discontinuità normativa in materia nucleare, culminata nei referendum del 1987 e del 2011, nonostante, agli inizi del 2025, sia stato depositato in Senato, su iniziativa popolare, il disegno di legge n. 1365, recante “*il nucleare nel mix elettrico nazionale ora*”, e, successivamente, il 17 ottobre, alla Camera dei Deputati, da parte del Consiglio dei Ministri, il disegno di legge delega n. 2669 in materia di “*energia nucleare sostenibile*”⁶. Tale discontinuità ha comportato dispersione di competenze tecniche, frammentazione delle responsabilità e difficoltà nella gestione coordinata del ciclo di vita degli impianti. Il confronto tra i due ordinamenti evidenzia come la sostenibilità nucleare non dipenda esclusivamente dal livello tecnologico, bensì dalla capacità di mantenere nel tempo coerenza normativa, stabilità regolatoria e continuità delle competenze.

In questa prospettiva può essere formulata una tesi di sistema: la stabilità normativa e la gestione integrata del ciclo di vita costituiscono condizioni strutturali della sostenibilità istituzionale nel settore nucleare. Il modello olandese mostra che la riduzione del rischio regolatorio è il prodotto di un ecosistema giuridico coerente, nel quale diritto, tecnica e finanza pubblica risultano integrati secondo una logica di responsabilità pubblica continuativa.

2. *Il nucleare nel sistema elettrico europeo: adeguatezza, sicurezza dell'approvvigionamento e programmabilità low-carbon*

La transizione energetica europea comporta una crescente penetrazione di fonti rinnovabili non programmabili, in partico-

⁶ In particolare, su tale “rilancio” del nucleare in Italia, si v. L. Colella, *Il “rilancio dell'energia nucleare” tra transizione climatica e sostenibilità ambientale: Francia e Italia a confronto*, in *Diritto dell'Ambiente e dell'Energia (DAE)*, n. 1, 2025, pp. 83-111.

lare eolico e fotovoltaico, con conseguente trasformazione dell'architettura dei sistemi elettrici.

Tale trasformazione non riguarda soltanto il *mix* energetico in termini percentuali, ma incide in modo strutturale sui parametri di stabilità, adeguatezza e resilienza della rete. Il passaggio da un sistema dominato da grandi centrali sincrone programmabili a un sistema con elevata quota di generazione *inverter-based* modifica infatti la fisica stessa del funzionamento della rete.

Nel lessico tecnico, l'adeguatezza misura la capacità del sistema di soddisfare la domanda elettrica in ogni istante, anche in condizioni di picco, indisponibilità di impianti o eventi climatici avversi. Tra gli indicatori più utilizzati figura il LOLE (*Loss of Load Expectation*), che esprime il numero atteso di ore all'anno in cui la domanda potrebbe non essere interamente coperta⁷. Tale parametro non è meramente statistico: rappresenta una metrica probabilistica della robustezza del sistema e costituisce uno strumento essenziale per la pianificazione delle capacità di riserva.

Secondo le analisi di ENTSO-E e dell'Agenzia internazionale dell'energia (IEA), i sistemi ad alta penetrazione rinnovabile richiedono meccanismi di compensazione della variabilità meteorologica⁸. In particolare:

- capacità di generazione programmabile;
- sistemi di accumulo elettrochimico o pompaggio;
- strumenti di *demand response*;
- interconnessioni transfrontaliere e mercati integrati.

La valutazione comparata tra diverse opzioni *low-carbon* deve dunque essere effettuata in chiave sistemica e non meramente impiantistica. Una tecnologia può essere a basse emis-

⁷ Cfr. https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/sdc-documents/MAF/2020/MAF_2020_Appendix_2_Methodology.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026); Cfr. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/7c671ef6-2947-4e87-beea-af0e1288e1d7/Electricity2025.pdf> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

⁸ Cfr. <https://tyndp.entsoe.eu/about> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026); Cfr. <https://iea.blob.core.windows.net/assets/81980a53-9716-47f1-904e-b92a2c4d2ea4/WorldEnergyOutlook2025.pdf> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

sioni, ma generare costi sistemici elevati in termini di riserva, flessibilità o stabilizzazione di frequenza.

In tale contesto, la generazione nucleare è caratterizzata da un elevato *capacity factor*, spesso superiore all'80-90%, con produzione continua e prevedibile⁹.

Dal punto di vista ingegneristico, la presenza di grandi macchine sincrone collegate a turbogeneratori contribuisce all'inerzia di sistema, ossia alla capacità della rete di opporsi a variazioni improvvise di frequenza. L'inerzia è un parametro fisico fondamentale: in un sistema elettrico, la frequenza deve essere mantenuta entro intervalli ristretti; una perdita improvvisa di potenza può generare oscillazioni rapide che, in assenza di adeguata inerzia, si propagano con maggiore intensità.

La progressiva riduzione dell'inerzia naturale nei sistemi dominati da fonti *inverter-based*, come il fotovoltaico, richiede soluzioni compensative, quali *synthetic inertia*, sistemi di accumulo con risposta rapida o servizi ancillari forniti da impianti convenzionali¹⁰. La questione non è dunque ideologica, ma sistemica: ogni opzione deve essere valutata in termini di contributo alla stabilità complessiva della rete.

Sul piano giuridico, la sicurezza energetica costituisce un obiettivo riconosciuto a livello europeo. L'art. 194 TFUE attribuisce all'Unione competenze in materia di sicurezza dell'approvvigionamento energetico, pur salvaguardando il diritto degli Stati membri di determinare il proprio *mix* energetico. Il Regolamento (UE) 2019/941 disciplina la preparazione ai rischi nel settore elettrico, imponendo obblighi di pianificazione e cooperazione tra Stati membri in caso di crisi.

La sicurezza energetica assume così una dimensione pubblica: essa non riguarda soltanto l'efficienza del mercato, ma la continuità dei servizi essenziali e la tutela dei diritti fondamentali che presuppongono l'accesso stabile all'energia. La dottrina ha

⁹ Cfr. <https://world-nuclear.org/images/articles/World%20Nuclear%20Performance%20Report%202025.pdf> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

¹⁰ Cfr. https://iea.blob.core.windows.net/assets/cd69028a-da78-4b47-b1bf-7520cdb20d70/Power_systems_in_transition.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

evidenziato come la sicurezza delle infrastrutture energetiche costituisca componente essenziale dell'interesse generale e, in ultima analisi, della stessa effettività dei diritti sociali¹¹.

Nel caso italiano, i rapporti annuali di *Terna* sull'adeguatezza del sistema elettrico mostrano come la progressiva decarbonizzazione richieda una pianificazione attenta delle capacità di riserva e degli strumenti di flessibilità¹². La questione non si esaurisce nella sostituzione di una fonte con un'altra, ma implica la ridefinizione dell'intera architettura di rete.

È pertanto possibile formulare una tesi ulteriore: la programmabilità *low-carbon* costituisce una variabile sistemica della transizione energetica; la sua rilevanza non è tecnologica in senso assoluto, ma funzionale alla sicurezza e all'adeguatezza del sistema elettrico nel quadro di una pianificazione coerente con i principi costituzionali. La dimensione tecnico-ingegneristica non può essere separata dalla dimensione giuridica: la stabilità di rete diviene, in ultima analisi, condizione di effettività dei diritti fondamentali connessi alla continuità dei servizi pubblici.

¹¹ Sul punto, si v. G. Gentile, *Lezioni di diritto dell'energia*, Giuffrè, Milano, 1989; C. Petteruti, *Diritto dell'ambiente e dell'energia. Profili di comparazione*, ESI, Napoli, 2020; G.P. Cirillo, *Intorno all'autonomia scientifica del diritto dell'energia*, in *Diritto dell'Ambiente e dell'Energia (DAE)*, n. 1, 2024, pp. 33-63; L.M. Pepe, *Il diritto dell'energia fondato su principi. La transizione ecologica come giustizia energetica*, in *AmbienteDiritto.it*, n. 4, 2021, pp. 1-25; M. Greco, *Prime note sulla dimensione costituzionale della povertà energetica. L'ipotesi di un diritto sociale all'energia*, in *Dirittifondamentali.it*, n. 2, 2023, pp. 437-460; R. Spagnuolo Vigorita, G.B. Conte, A. Persico, *La presunzione di interesse pubblico prevalente per le fonti energetiche rinnovabili: un tentativo di inquadramento sistematico*, in *CERIDAP*, n. 3, 2025, pp. 241-270; A. Maltoni, *Misure di semplificazione, impianti di 'interesse pubblico prevalente' nel d.lgs. n. 190/2024 per una 'più equilibrata' ponderazione tra interessi diversi. Profili di criticità della disciplina della PAS*, in *CERIDAP*, 12 gennaio 2026, disponibile al seguente link: <https://ceridap.eu/misure-di-semplificazione-impianti-di-interesse-pubblico-prevalente-nel-d-lgs-n-190-2024-per-una-piu-equilibrata-ponderazione-tra-interessi-diversi-profil-di-c/> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026); R. Rolli, F. De Cicco, *CER: fra disciplina europea, principi costituzionali e ruolo degli Enti Locali*, in *Rivista di Diritto ed Economia dei Comuni*, n. 2, 2024, pp. 69-78.

¹² Da ultimo, si veda l'ultimo report del 2024, disponibile al seguente link: https://download.terna.it/terna/Terna_Rapporto_Adeguatezza_Italia_2024_8dd57f5cd7c797a.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

3. *Sicurezza nucleare e regolazione multilivello del rischio: defence in depth, analisi probabilistica e principio di precauzione*

La sicurezza nucleare costituisce il nucleo tecnico-giuridico della sostenibilità dell'opzione atomica. A differenza di altre tecnologie energetiche, essa si caratterizza per una strutturazione multilivello della protezione, formalizzata nel principio della *defence in depth*, elaborato in ambito IAEA e recepito nei sistemi regolatori nazionali ed europei¹³. La sicurezza non è concepita come affidamento su una singola barriera o su un'unica misura tecnica, bensì come architettura stratificata di prevenzione, controllo e mitigazione.

Il principio della *defence in depth* si articola in una sequenza di barriere fisiche e organizzative finalizzate a prevenire il rilascio incontrollato di materiale radioattivo. In termini funzionali, le principali fasi comprendono:

- prevenzione dell'evento iniziatore;
- controllo delle anomalie operative;
- gestione degli incidenti di progetto;
- mitigazione degli incidenti oltre il progetto;
- protezione della popolazione e dell'ambiente.

Dal punto di vista ingegneristico, tale architettura implica la presenza di sistemi ridondanti e diversificati, progettati in modo da evitare punti singoli di vulnerabilità. I sistemi di raffreddamento del nocciolo, ad esempio, sono concepiti per funzionare anche in caso di perdita dell'alimentazione elettrica esterna, attraverso generatori diesel di emergenza, sistemi passivi o ulteriori linee di *backup*¹⁴. La ridondanza non è un eccesso prudenziale, ma una risposta strutturale alla necessità di gestire eventi a bassa probabilità ma ad alto impatto.

L'approccio deterministico tradizionale, fondato sulla definizione di scenari di progetto e sul dimensionamento dei sistemi per farvi fronte, è oggi integrato dall'Analisi Probabilistica di Si-

¹³ Cfr. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1273_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

¹⁴ Cfr. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1534_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

curezza (*Probabilistic Safety Assessment* - PSA)¹⁵. La PSA consente di modellizzare le sequenze di guasto, quantificare la frequenza attesa di danneggiamento del nocciolo (*Core Damage Frequency*) e individuare le componenti critiche del sistema. Non si tratta di sostituire la progettazione deterministica, ma di affiancarla con una valutazione quantitativa del rischio residuo, in un'ottica di miglioramento continuo.

L'incidente di *Fukushima* del 2011 ha rappresentato un momento di svolta nella riflessione europea sulla sicurezza¹⁶. In ambito UE, ENSREG ha coordinato gli stress test sugli impianti esistenti, verificando la resistenza a eventi naturali estremi e a scenari combinati, quali terremoti, inondazioni e perdita prolungata di alimentazione elettrica¹⁷. Le raccomandazioni successive hanno enfatizzato:

- il rafforzamento dei sistemi di raffreddamento di emergenza;
- la protezione contro eventi esterni multipli;
- il potenziamento delle misure di *severe accident management*;
- la revisione dei piani di emergenza e delle comunicazioni con le autorità locali.

La sicurezza nucleare, pertanto, non è statica ma evolutiva: si fonda su apprendimento continuo, revisione periodica degli standard e recepimento delle lezioni apprese dagli eventi internazionali. In questo senso, il sistema multilivello, nazionale, eu-

¹⁵ Cfr. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1430_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

¹⁶ Per un approfondimento sul quadro giuridico energetico post *Fukushima*, si v. L. Chieffi, F. Pinto (a cura di), *Il governo dell'energia dopo Fukushima*, ESI, Napoli, 2013; G. Vatinno, *Ecologia politica. La fine del nucleare*, Armando Editore, Roma, 2011; A. Farruggia, *Fukushima. La vera storia della catastrofe nucleare che ha sconvolto il mondo*, Marsilio, Venezia, 2012; L. Colella, *L'evoluzione della legislazione italiana nel settore dell'energia elettronucleare nell'era della green economy: il futuro del «nucleare civile» dopo Fukushima*, in *Rivista Giuridica dell'Ambiente* - RGA, Anno XXVIII, n. 2, 2013, pp. 169-2016; S. Nespore, *Catastrofi naturali e catastrofi tecnologiche. Riflessioni sul caso giapponese*, in *Federalismi.it*, 23 marzo 2011.

¹⁷ Cfr. https://www.ensreg.eu/sites/default/files/EU%20Stress%20Test%20Peer%20Review%20Final%20Report_0.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

ropeo, IAEA, produce un effetto di convergenza regolatoria e di rafforzamento progressivo degli standard.

Elemento centrale è la cultura della sicurezza che, secondo gli standard IAEA, implica l'interiorizzazione, da parte dell'intera organizzazione, della priorità assoluta della sicurezza rispetto a obiettivi produttivi o economici¹⁸. La sicurezza non è soltanto ingegneria, ma anche *governance* organizzativa, formazione continua, trasparenza e indipendenza decisionale.

Sul piano giuridico, la sicurezza nucleare si intreccia con il principio di precauzione¹⁹, elaborato dalla Corte di giustizia dell'Unione europea quale criterio di gestione del rischio in situazioni di incertezza scientifica²⁰. La precauzione non impone il divieto assoluto dell'attività rischiosa, ma richiede che la decisione pubblica sia fondata su una valutazione scientifica adeguata, proporzionata e continuamente aggiornata.

In questo senso, il nucleare rappresenta un paradigma di regolazione del rischio: attività ad alto contenuto tecnologico, ammesse solo in presenza di sistemi di controllo stringenti e verificabili.

Anche la giurisprudenza costituzionale italiana ha affermato che, in presenza di rischi per la salute e l'ambiente, il legislatore

¹⁸ Cfr. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1682_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

¹⁹ Sul principio di precauzione, si v. D. Amirante, *Diritto ambientale italiano e comparato. Principi*, Jovene, Napoli, 2003; M. Cafagno, *Principi e strumenti di tutela dell'ambiente. Come sistema, complesso, adattivo, comune*, G. Giappichelli Editore, Torino, 2007; B. Caravita, L. Cassetti, A. Morrone, *Diritto dell'ambiente*, Il Mulino, Bologna, 2016; G. Cordini, P.E.M. Fois, S. Marchisio, *Diritto ambientale. Profili internazionali europei e comparati*, G. Giappichelli Editore, Torino, 2024; G. Cordini, *Diritto ambientale comparato*, in P. Dell'Anno, E. Picozza (a cura di), *Trattato di diritto dell'ambiente. Principi generali*, Cedam, Padova, 2012, pp. 101-145; P. Dell'Anno, *Principi del diritto ambientale europeo e nazionale*, Giuffrè Editore, Milano, 2004; G. Rossi (a cura di), *Diritto dell'ambiente*, G. Giappichelli Editore, Torino, 2021; U. Salanitro, *I principi generali nel Codice dell'ambiente*, in *Giornale di diritto amministrativo*, n. 1, 2009, pp. 103-110.

²⁰ In particolare, sul formante giurisprudenziale, si vedano i casi *Pfizer Animal Health SA c. Consiglio dell'Unione europea* (T-13/99) e *The Queen c. Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, Commissioners of Customs & Excise, National Farmers' Union e altri* (C-157/96).

e l'amministrazione devono adottare misure ragionevoli e proporzionate²¹. Nel settore nucleare, tale principio si traduce nell'obbligo di assicurare standard di sicurezza elevati e in continuo aggiornamento, nonché in un sistema di autorizzazione e controllo che renda effettiva la tutela della collettività.

La combinazione tra *defence in depth*, PSA e principio di precauzione consente di superare la rappresentazione dicotomica tra sicurezza assoluta e rischio inaccettabile²². La sicurezza nucleare è un processo dinamico, fondato su stratificazione di barriere, valutazione probabilistica, revisione periodica e controllo pubblico indipendente.

Può dunque formularsi una ulteriore tesi di sistema: la sostenibilità tecnica del nucleare è il risultato di un sistema integrato di barriere ingegneristiche, cultura organizzativa e controllo giuridico proporzionato; la sicurezza non è condizione statica, ma processo regolato, verificabile e aggiornabile nel tempo. In questa prospettiva, la dimensione tecnico-ingegneristica non è esterna al diritto, ma ne costituisce presupposto materiale di legittimazione.

4. *Gestione del back-end e responsabilità intergenerazionale: il tempo lungo del nucleare tra diritto europeo e parametro costituzionale*

Se la fase di esercizio dell'impianto nucleare costituisce la dimensione produttiva visibile, la gestione del *back-end*, combu-

²¹ Sul punto, si vedano le sentenze emesse dalla Corte costituzionale nel noto caso "ILVA di Taranto" e, in particolare, Corte cost., 9.4.2013, n. 85; Corte cost., 7.2.2018, n. 58. Da ultimo, si v. Corte cost., 7.5.2014, n. 105. Su quest'ultima, si v. G. Vivoli, *L'eterna provvisorietà di misure straordinarie è (ed era) incostituzionale: la doppia chiave di lettura della Sentenza n. 105/2014 sul c.d. "Decreto Priolo" alla luce della riforma degli artt. 9 e 41 Cost.*, in *AmbienteDiritto.it*, n. 4, 2014, pp. 1-22; M. Ceruti, *Bilanciamento governativo degli interessi e sindacato giurisdizionale per gli impianti industriali di interesse strategico. Le due facce della prima pronuncia della Consulta sulla riforma degli artt. 9 e 41 della Carta*, in *Rivista Giuridica dell'Ambiente online*, n. 57, 2014, pp. 1-18.

²² Sul concetto di "rischio calcolato", si v. V. Pepe, *Energia nucleare, ambiente e democrazia: Italia e Francia a confronto*, in *Federalismi.it*, 2, 2019, pp. 2-18.

stibile esaurito, rifiuti radioattivi e *decommissioning*, rappresenta la verifica più rigorosa della sostenibilità nel tempo lungo. A differenza di altre tecnologie energetiche, il nucleare implica una responsabilità estesa ben oltre la vita utile dell'impianto, proiettandosi su orizzonti temporali che eccedono la normale pianificazione amministrativa e finanziaria.

La gestione dei rifiuti ad alta attività comporta, infatti, scale temporali plurimillennarie, con particolare riferimento al parametro intergenerazionale. La sostenibilità nucleare non può dunque essere valutata esclusivamente in termini di emissioni evitate, ma deve essere misurata rispetto alla capacità dell'ordinamento di governare responsabilità che si estendono nel tempo lungo.

La Direttiva 2011/70/EURATOM impone agli Stati membri l'adozione di un quadro nazionale per la gestione responsabile e sicura del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi.

Essa richiede:

- definizione chiara delle responsabilità istituzionali;
- predisposizione di un programma nazionale dettagliato;
- istituzione di un'autorità competente;
- garanzia della disponibilità di risorse finanziarie adeguate²³.

Il principio cardine è che la responsabilità ultima per la gestione dei rifiuti permane in capo allo Stato membro, anche quando le attività operative siano affidate a soggetti privati. Ciò conferma la natura pubblicistica della scelta nucleare: la collettività assume, in ultima istanza, la garanzia del ciclo di vita.

Dal punto di vista tecnico-ingegneristico, la soluzione generalmente individuata per i rifiuti ad alta attività è il deposito geologico profondo. La progettazione di tali infrastrutture richiede analisi integrate di:

- stabilità geomeccanica del sito ospitante;
- idrogeologia di lungo periodo e modellazione dei flussi sotterranei;

²³ L. Colella, *Il deposito nazionale delle scorie radioattive in Italia: ritorno al futuro. Note "a caldo" sulla pubblicazione della Carta nazionale dei siti potenzialmente idonei* (CNAPI), in *Quaderni Amministrativi*, n. 1, 2021, p. 18.

- resistenza e durabilità dei contenitori e delle barriere ingegneristiche;
- modellazione probabilistica di scenari di rilascio radiologico²⁴.

L'analisi di sicurezza si fonda su modelli predittivi che integrano dati geologici, chimici e radiologici, simulando l'evoluzione del sistema su orizzonti temporali estremamente estesi.

Ciò solleva questioni epistemologiche e giuridiche di particolare rilievo: la previsione scientifica è necessariamente probabilistica, mentre la responsabilità giuridica deve restare determinata e imputabile. Il diritto è chiamato a governare l'incertezza senza paralizzare la decisione.

Il regime internazionale della responsabilità civile per danni nucleari è disciplinato dalla Convenzione di Parigi del 1960 e dalla Convenzione complementare di Bruxelles del 1963, successivamente aggiornate. Esso si fonda su principi cardine:

- responsabilità oggettiva dell'operatore;
- canalizzazione esclusiva della responsabilità;
- obbligo di copertura assicurativa;
- limiti massimi di risarcimento integrati da intervento pubblico.

La responsabilità oggettiva risponde all'esigenza di semplificare l'onere probatorio in caso di danno nucleare, garantendo tutela effettiva alle vittime. Al contempo, la previsione di limiti massimi e di meccanismi di integrazione statale evidenzia il coinvolgimento della collettività nella gestione del rischio residuo.

In Italia, ad esempio, il d.lgs. 31/2010 ha disciplinato la localizzazione, realizzazione ed esercizio del deposito nazionale per i rifiuti radioattivi. Il percorso attuativo ha messo in luce la complessità delle dinamiche territoriali, la rilevanza della partecipazione pubblica e l'importanza della trasparenza, in coerenza con la Convenzione di Aarhus del 1998. La legittimazione de-

²⁴ Cfr. <https://www.oecd-neo.org/upload/docs/application/pdf/2019-12/2048-geological-disposal.pdf> (ultimo accesso: 20 febbraio 2026); Cfr. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1449_web.pdf (ultimo accesso: 20 febbraio 2026).

mocratica della scelta infrastrutturale diviene parte integrante della sostenibilità istituzionale.

La gestione del *back-end* costituisce pertanto il banco di prova della sostenibilità istituzionale del nucleare. Solo un sistema che garantisca responsabilità chiara, copertura finanziaria adeguata e trasparenza può dirsi conforme al parametro intergenerazionale costituzionale. La questione non è meramente tecnica, ma profondamente costituzionale: riguarda la capacità dello Stato di assumere decisioni infrastrutturali ad altissima intensità temporale senza compromettere l'equità tra generazioni.

5. *Riflessioni conclusive: il perimetro di governabilità come criterio di sostenibilità istituzionale*

L'analisi sviluppata nel presente contributo consente di superare la rappresentazione binaria del dibattito nucleare, spesso polarizzato tra adesione tecnologica e rifiuto ideologico. La questione centrale non risiede nella valutazione astratta della tecnologia, bensì nella capacità dell'ordinamento di governarne gli effetti nel tempo lungo. Il nucleare, più di altre opzioni energetiche, rende evidente che la sostenibilità è una proprietà del sistema istituzionale prima ancora che del dispositivo tecnico²⁵.

Le tesi progressivamente formulate – dalla stabilità normativa come riduzione del rischio regolatorio, alla programmabilità *low-carbon* come variabile sistemica, alla sicurezza multilivello fondata su *defence in depth* e PSA, fino alla gestione del *back-end* quale banco di prova intergenerazionale – convergono nel dimostrare che la decisione nucleare è anzitutto una questione di architettura istituzionale.

²⁵ Sul concetto di sostenibilità, senza esigenze di esaustività, si v. K. Bosselmann, *The Principle of Sustainability: Transforming Law and Governance*, Ashgate Publishing, Burlington, 2008; V. Pepe, *Fare ambiente. Teorie e modelli giuridici di sviluppo sostenibile*, Franco Angeli, Milano, 2008; D. Porena, *Il principio della sostenibilità. Contributo allo studio di un programma costituzionale di solidarietà intergenerazionale*, Torino, G. Giappichelli, 2017; A. Angelini, P. Pizzuto, *Manuale di ecologia, sostenibilità ed educazione ambientale*, Franco Angeli, Milano, 2007; T. Groppi, *Sostenibilità e costituzioni: lo Stato costituzionale alla prova del futuro*, in DPCE, n. 1, 2016, Il Mulino, pp. 43-78.

La sostenibilità, tradizionalmente declinata in termini ambientali ed emissivi, deve essere integrata da una dimensione istituzionale. Una tecnologia può contribuire alla decarbonizzazione e tuttavia risultare non sostenibile qualora manchino:

- stabilità normativa;
- indipendenza regolatoria effettiva;
- copertura finanziaria dell'intero ciclo di vita;
- compatibilità territoriale;
- legittimazione democratica e trasparenza decisionale.

Il concetto di “perimetro di governabilità” proposto in questo lavoro si configura come categoria analitica idonea a verificare la coerenza sistemica tra dimensione tecnica e assetto istituzionale. Esso non si limita a misurare la performance impiantistica, ma valuta la capacità dell'ordinamento di mantenere nel tempo una decisione infrastrutturale ad alta intensità regolatoria e intergenerazionale.

Nel caso olandese, il perimetro di governabilità risulta definito da alcune condizioni strutturali:

- permanenza di una legge-quadro stabile (*Kernenergiewet*);
- presenza di un'autorità indipendente (ANVS) dotata di competenze tecniche e poteri di enforcement;
- gestione centralizzata del *back-end* (COVRA);
- integrazione multilivello con *EURATOM* e con gli standard IAEA;
- pianificazione finanziaria del *decommissioning* e dello stoccaggio a lungo termine.

L'integrazione tra diritto, tecnica e finanza pubblica appare qui particolarmente evidente.

La sostenibilità tecnologica non è il prodotto di una singola innovazione ingegneristica, ma di un ecosistema regolatorio coerente, nel quale la decisione pubblica mantiene continuità nel tempo e garantisce prevedibilità agli operatori.

La comparazione con ordinamenti caratterizzati da discontinuità normativa, come l'esperienza italiana post-referendaria, mostra che l'assenza di continuità istituzionale può generare dispersione di competenze, incertezza finanziaria e difficoltà nella

gestione del ciclo di vita. Il problema non è la scelta in sé, ma la capacità di sostenerla nel tempo lungo.

Il parametro intergenerazionale introdotto nell'art. 9 Cost. rafforza questa impostazione. La tutela dell'ambiente e degli ecosistemi, anche nell'interesse delle future generazioni, impone che la decisione energetica sia valutata alla luce della responsabilità temporale che essa comporta²⁶. In tale prospettiva, la sostenibilità istituzionale diviene criterio ordinante della transizione: non basta ridurre le emissioni, occorre garantire che il ciclo di vita sia governato con responsabilità finanziaria e trasparenza.

Il modello olandese dimostra che la sostenibilità tecnologica è il prodotto di un ecosistema istituzionale integrato, nel quale diritto, tecnica e finanza pubblica operano in modo coordinato e stabile. La trasferibilità del modello, tuttavia, non può essere data per scontata: essa presuppone condizioni strutturali, continuità normativa, competenze tecniche consolidate, indipendenza regolatoria, fiducia pubblica, che devono essere costruite nel tempo.

In conclusione, la qualità delle istituzioni precede la scelta tecnologica. La transizione energetica non è soltanto questione di *mix* produttivo, ma di architettura costituzionale e capacità di go-

²⁶ Sulla riforma "epocale" degli artt. 9 e 41 Cost. in senso ambientale, la dottrina è copiosa. In particolare, si veda D. Amirante, *Costituzionalismo ambientale. Atlante giuridico per l'Antropocene*, Il Mulino, Bologna, 2022, pp. 257-268.; M. Cecchetti, *La revisione degli articoli 9 e 41 della Costituzione e il valore costituzionale dell'ambiente: tra rischi scongiurati, qualche virtuosità (anche) innovativa e molte lacune*, in *Forum di Quaderni Costituzionali*, n. 3, 2021, pp. 285-314; F. Rescigno, *Quale riforma per l'articolo 9*, in *Federalismi.it*, 23 giugno 2021; L. Cassetti, *Salute e ambiente come limiti "prioritari" alla libertà di iniziativa economica*, in *Federalismi.it*, 23 giugno 2021; T. E. Frosini, *La Costituzione in senso ambientale. Una critica*, in *Federalismi.it*, 23 giugno 2021; I. A. Nicotra, *L'ingresso dell'ambiente in Costituzione, un segnale importante dopo il Covid*, in *Federalismi.it*, 30 giugno 2021; A. L. De Cesaris, *Ambiente e Costituzione*, in *Federalismi.it*, 30 giugno 2021; G. Di Plinio, *L'insostenibile evanescenza della costituzionalizzazione dell'ambiente*, in *Federalismi.it*, 30 giugno 2021; R. Bifulco, *Primissime riflessioni intorno alla l. cost. 1/2022 in materia di tutela dell'ambiente*, in *Federalismi.it*, 6 aprile 2022; L. Cassetti, *Riformare l'art. 41 della Costituzione: alla ricerca di "nuovi" equilibri tra iniziativa economica privata e ambiente?* in *Federalismi.it*, n. 4, 2022, pp. 188-201; A. Mitrotti, *Territorio, interessi in contesa e modifiche agli articoli 9 e 41 Cost.: Prime riflessioni sul "permitting" ambientale*, in *Società e diritti*, n. 13, 2022, pp. 82-120.

verno del tempo lungo. Il “*perimetro di governabilità*” consente di valutare se un ordinamento sia effettivamente in grado di assumere e mantenere una decisione nucleare nel rispetto dei principi di sicurezza, proporzionalità e responsabilità intergenerazionale.

Abstract

Il contributo analizza il modello nucleare dei Paesi Bassi quale paradigma di sostenibilità istituzionale nel settore atomico. La ricerca evidenzia come la continuità della disciplina primaria, l'indipendenza regolatoria e la *governance* integrata del ciclo di vita costituiscano fattori decisivi per la riduzione del rischio regolatorio e la tenuta della scelta nucleare nel tempo lungo. Il nucleare è inoltre esaminato nella transizione energetica europea quale fonte programmabile *low-carbon* funzionale all'adeguatezza e alla sicurezza dell'approvvigionamento. La sicurezza multilivello e la gestione intergenerazionale del *back-end* completano il quadro, conducendo alla proposta del “perimetro di governabilità” come criterio sintetico di valutazione comparata.

Parole chiave: Energia nucleare; Rischio regolatorio; *Governance* del ciclo di vita; Responsabilità intergenerazionale; Transizione energetica.

This paper examines the Dutch nuclear governance model as a paradigm of institutional sustainability in the atomic sector. It argues that regulatory continuity, independent supervision and integrated life-cycle governance are decisive factors in mitigating regulatory risk and ensuring long-term policy stability. Nuclear energy is also assessed within the European energy transition as a programmable low-carbon source contributing to system adequacy and security of supply. Multi-level safety and intergenerational back-end management complete the framework, leading to the proposal of the “governability perimeter” as a synthetic comparative criterion.

Keywords: Nuclear energy; Regulatory risk; Life-cycle governance; Intergenerational responsibility; Energy transition.

