

io
roma

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

N 4S/2023

Quaderno

Rapporto sullo sviluppo nucleare italiano nel
quadro di un mix energetico ottimizzato



16%

59%

S 18788.1
€ 22656.9
V 7913.4

Quaderno

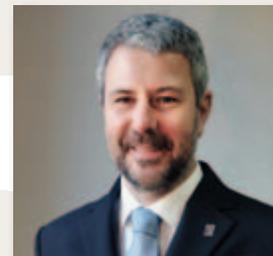


In copertina:
Immagine di repertorio



Il saluto del Presidente

Ing. Massimo Cerri



ACCORDO DI COLLABORAZIONE TRA IL CONSORZIO DTT S.C.A.R.L. E L'ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

La firma dell'accordo di collaborazione tra il Consorzio DTT S.c.a.r.l. e l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, avvenuta lo scorso giugno, rappresenta un motivo di vanto e orgoglio per tutti. Da anni il nostro Ordine è impegnato tramite l'Area Nucleare, composta da tre Commissioni Specifiche (Ricerca e Reattori Innovativi, Gestione Impianti Nucleari e Radioprotezione ed Emergenze), nella diffusione di conoscenze e competenze sull'energia nucleare, attraverso approfondimenti, ricerca, formazione e divulgazione.

Offriamo, altresì, supporto alle Istituzioni tramite guide tecniche e pareri su normativa specifica. Siamo sempre stati consapevoli, "ante litteram" rispetto alle attuali gravi crisi sia energetica sia geopolitica, che l'energia nucleare può svolgere un ruolo complementare a quello delle fonti rinnovabili, garantendo stabilità e contribuendo alla sostenibilità ambientale del sistema elettrico, alla luce degli ambiziosi target di decarbonizzazione europei e italiani che fissano al 2050 il raggiungimento della neutralità climatica.

Oggi sappiamo che la ricerca scientifica sull'energia atomica va avanti in maniera decisa. Lo studio del divertore è oggi una delle principali urgenze nella ricerca sulla fusione, sul quale si stanno concentrando sforzi teorici e sperimentali da tutto il mondo. L'Italia, forte della sua tradizione d'eccellenza nella fisica e nell'ingegneria, ha deciso di prendere la guida di questa epocale iniziativa internazionale proponendo la costruzione di quello che, da Galileo in poi, è lo strumento fondamentale per la scienza moderna: un esperimento. E non un esperimento da poco, ma quello che si avvia a diventare il principale tokamak europeo e il più completo e flessibile esperimento al mondo per lo studio del divertore: la Divertor Tokamak Test facility.

DTT è un concentrato di alta tecnologia concepito nei laboratori ENEA di Frascati e progettato da ricercatori, oltre che dell'ENEA, di Università ed Enti di ricerca italiani e dei consorzi Create e RFX. Il cuore del dispositivo è una ciambella di acciaio di circa sei metri di diametro esterno.

Al suo interno si raggiungeranno condizioni di vuoto spinto (inferiore a 10^{-7} mbar, pari a meno di un milionesimo della pressione atmosferica) e si produrrà – ingabbiato da un campo magnetico di sei Tesla, un valore tra i più alti mai raggiunti in un grande tokamak – un plasma che alle massime prestazioni raggiungerà una temperatura di circa settanta milioni di gradi.

Un ruolo cruciale in DTT lo ha naturalmente il divertore, anzi i divertori dato che DTT ne può ospitare ben due: quello iniziale, nella parte inferiore del dispositivo e, nella parte superiore, quello che potrà essere installato in un secondo momento.

Tramite l'accordo, che ha prodotto anche una visita tecnica presso l'Enea-Centro di Frascati si è aperta una riflessione sulla transizione energetica italiana.

L'obiettivo nell'immediato è quello di valorizzare le competenze presenti nel nostro Ordine relative alla filiera nucleare, testimonianza questa dell'alto valore aggiunto dei nostri tecnici.

Ing. Massimo Cerri
Presidente
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

L'Editoriale

Ing. Maria Elena D'Effremo



Questo Quaderno Speciale 4/2023 valorizza il grande impegno profuso dagli iscritti alle commissioni afferenti all'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri di Roma che sin da sempre si contraddistinguono per un'intensa attività intellettuale volta alla diffusione della cultura sull'energia nucleare.

È noto che il dibattito sul nucleare in Italia va avanti da decenni, e ad oggi, seppur l'ideale sembrerebbe la quasi completa archiviazione delle fonti fossili, il nucleare sembra non spiccare il volo.

È fondamentale come Ordine degli Ingegneri illustrare i pro e i contro di qualsivoglia tecnologia.

È fondamentale inoltre diffondere e valorizzare l'avanzamento della "tecnica" che proviene da nuove frontiere di ricerca che permettono, a ragion veduta, a tutti i settori dell'ingegneria, di avanzare con costanza e talvolta anche con momenti disruptive.

D'altronde l'ingegneria non è fine a sé stessa, ma è a servizio di tutti noi, e nella costante evoluzione della Società, anch'essa avanza, migliora, impara dagli errori del passato, impara dagli approcci tecnici rivelatisi vincenti nel passato, promuove frontiere di ricerca avanzata così come avviene in altri settori - si pensi al settore medico sanitario - che potrebbero essere utili nel futuro per avere a nostro servizio tecnologie migliori e professionisti al passo con il cambiamento della Società.

Nessun settore ingegneristico è indenne da questo continuo processo di "miglioramento" ed "evoluzione", come nelle nostre vite, tutto può migliorare, basta volerlo e avere la lungimiranza di accogliere le idee, percezioni e motivazioni altrui.

Un grazie all'Area Nucleare dell'Ordine e a tutte le commissioni afferenti, per il grande e costante impegno che ripongono nelle loro attività.

Non mi resta che augurarvi buona lettura, ricordandovi che nell'ottica di un approccio più agile e mirato alla condivisione, anche IO Roma si è dotata di una pagina LinkedIn, "IO Roma Rivista dell'Ordine Ingegneri della provincia di Roma", che vi invito a seguire, così come vi invito a consultare la pagina <https://ioroma.info/>.

Ing. Maria Elena D'Effremo
Direttrice Editoriale



12.78



55.39



+08.5

COM

POT: 78.05

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20

21.00 +

55.39

8.904

TU Qi p0 AW

58.02

55.39



L'Editoriale

Ing. Alberto Taglioni



L'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, unico Ordine professionale italiano ad occuparsi in maniera esplicita di Nucleare (circostanza, questa, indubbiamente dovuta alla centralità nazionale delle sedi di Organi pubblici e privati coinvolti e dei professionisti che vi operano), è strutturata in tre Commissioni tematiche:

- la Commissione GESTIONE IMPIANTI NUCLEARI E DECOMMISSIONING;
- la Commissione RADIOPROTEZIONE ED EMERGENZE;
- la Commissione RICERCA E REATTORI INNOVATIVI.

che operano in modo sinergico, e sono costituite in totale da circa 60 ingegneri, che svolgono o hanno svolto la loro professione "sul campo", dove ogni aspetto tecnico ha stretta interfaccia con tutte le branche ingegneristiche, non solo con quella specialistica.

In qualità di Referente presso il Consiglio dell'Ordine dell'attività delle tre Commissioni, nel ringraziare la Commissione Ricerca e Reattori Innovativi che questo rapporto, da me auspicato, ha prodotto, desidero ricordare allo stesso modo, e sottolineare, l'impegno dei componenti delle altre Commissioni, il cui ambito di applicazione è strettamente connesso e complementare ai temi che in questa sede sono stati affrontati, ed è oggetto da parte loro di costante aggiornamento tecnico-scientifico e analisi del quadro legislativo e istituzionale.

La consapevolezza implicita della validità di queste competenze nelle trattazioni che seguiranno, non può che conferire valore aggiunto all'intero rapporto, perché esse potranno e dovranno parimenti essere coinvolte nell'implementazione di un eventuale piano nazionale di produzione energetica da fonte nucleare.

Né potrebbe essere diversamente se si considera che, come per ogni opera ingegneristica, e a maggior ragione per quelle di alta natura strategica, gli aspetti di gestione e futura dismissione e di controllo su salute e ambiente assumono la stessa valenza di quelli progettuali, dovendosene tener conto fin dal loro concepimento; in questo senso vale la pena di ricordare che le prime installazioni nucleari costituirono un battistrada: per la prima volta lo studio delle ricadute dell'opera sull'ambiente fu contestuale all'esame e all'adozione delle variabili ambientali di progetto.

Nel nostro Paese il ricorso al nucleare, da un punto di vista strettamente tecnico-economico, appare oggi come oggi quasi ineluttabile, stante l'attuale offerta energetica, influenzata anche da emergenze climatiche e crisi internazionali: si veda come l'energia nucleare, in confronto ad altri tipi di energia oggi conosciuti e implementati, presenta oggettivi e innegabili vantaggi, dimostrabili attraverso analisi su costi e occupazione territoriale, rispettivamente a parità di energia prodotta e di potenza erogata, oltre che con le constatabili pressoché nulle emissioni di CO₂.

Ben consci tuttavia che, alla luce del rilevante impatto sociale e politico del tema, ogni decisione in merito non potrà basarsi in modo esclusivo su questi dati, gli ingegneri dell'Area Nucleare dell'Ordine rinnovano il proprio impegno a favore di colleghi e tecnici tutti in termini di aggiornamento e assistenza professionale, pronti a fornire supporto in qualsivoglia ambito decisionale in quel che concerne ogni valutazione tecnica inerente alla materia.

Ing. Alberto Taglioni
Referente Area Nucleare

L'Editoriale

Ing. Massimo Sepielli



La Commissione Ricerca e Reattori Innovativi (RRI) dell'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, in considerazione del sempre maggior interesse che l'utilizzo dell'energia nucleare sta riscuotendo nella nostra Nazione a livello governativo, industriale e sociale, ha inteso formulare un possibile approccio ingegneristico per un piano elettrico/energetico nazionale al fine di assicurare il soddisfacimento del fabbisogno Italiano in modo sostenibile, de-carbonizzato, realistico, proponendo tecnologie nucleari avanzate di pronto impiego, tese a contenere le importazioni di gas estero e integrare tutte le fonti endogene attraverso il criterio della neutralità tecnologica.

Lo studio della Commissione parte dall'analisi degli attuali consumi energetici ed elettrici nazionali e dal mix energetico Italiano di produzione, ad oggi ancora fortemente sbilanciato verso l'utilizzo delle fonti fossili, olio combustibile, carbone, e soprattutto gas, quasi completamente di importazione, così come la quota di potenza elettrica assorbita dalla rete Europea, prodotta essenzialmente dalle centrali elettronucleari oltre confine.

Un requisito fondante del mix energetico che sottende al piano è quello di essere non solo *carbon-free* (o quantomeno *low-carbon*), con il contenimento delle emissioni di gas-serra, ma di tener conto della intensità e della costanza della produzione, oltre che dell'integrazione territoriale delle fonti.

Il risultato dello studio porta ad un contributo significativo dell'energia nucleare da fissione prodotta in maniera endogena, ad un contenimento dell'uso del gas, ridotto ma non eliminabile (*hard to abate*), ad un apporto delle energie rinnovabili tradizionali e di quelle "nuove" FER non programmabili nella misura del loro fattore medio di carico (ore/anno di funzionamento a potenza nominale), per assicurare la stabilità della rete elettrica.

L'analisi va quindi a considerare le tecnologie nucleari "pronto impiego" nella versione *full scale* (taglie intorno a 1000 MWe), già in operazione o in costruzione all'estero, che possono trovare la loro collocazione ottimale in rapporto alle esigenze specifiche del territorio. Infatti lo studio conduce, nel rispetto dei criteri di accettabilità ed esclusione, alla localizzazione ed implementazione di potenza da centrali elettro-nucleari laddove vi è maggiore necessità e consumo di energia, anche con riutilizzo di aree industriali e demaniali dismesse.

Il rapporto fornisce anche lo stato dell'arte delle attività di ricerca nucleare come la fusione e altre applicazioni nucleari energetiche, con adeguato *Technology Readiness Level* (TRL), al fine di definire con chiarezza le tempistiche e le criticità.

Il rapporto non affronta in questo Quaderno Speciale le questioni legate al ciclo del combustibile nucleare ed alla gestione dei rifiuti radioattivi, come pure specifiche tematiche di sicurezza e radioprotezione, non tratta delle tecnologie degli *Small Modular Reactors* (SMR), che saranno oggetto di Quaderni Speciali successivi a cura della Commissione e dell'Area Nucleare.

Si ritiene che il Quaderno possa essere di utilità per tutti gli Ingegneri dell'Ordine di Roma, ma anche per tutti gli ingegneri e addetti ai lavori del settore, e possa offrire ai decisori politici le informazioni tecniche ed ingegneristiche per mettere in campo scelte realistiche e consapevoli.

Ing. Massimo Sepielli
Presidente
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi

Gli Autori

Gli Autori di questo Rapporto sono membri della Commissione Ricerca e Reattori Innovativi dell'Area Nucleare dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma.

La Commissione Ricerca e Reattori Innovativi è formata da Ingegneri industriali, nucleari, energetici e nucleari, meccanici, elettronici, chimici, impegnati, a vario titolo, nel settore dell'Ingegneria nucleare.

Tra i membri della Commissione vi sono sia Ingegneri che lavorano e che hanno lavorato presso i più importanti Enti italiani del settore della ricerca, della gestione e della sicurezza in campo nucleare ed energetico sia Ingegneri che lavorano in qualità di liberi Professionisti prestando servizi di Ingegneria e di progettazione nel campo energetico, civile ed industriale e di Consulenti Tecnici di Ufficio anche in ambito nucleare.

Si ringraziano i Colleghi di Commissione che hanno collaborato alla stesura del rapporto:

Ingg. Massimo Sepielli, Alessandra Di Pietro, Antonio De Blasiis, Giuseppe Canzone, Andrea Tonti, Roberto Antonio Di Marco, Giancarlo Chiocchia, Mauro Olivetti, Giorgio Giorgiantoni, Tonino Palma, Paolo Allievi, Vittorio Violante Ruggi D'Aragona, Mauro Cappelli, Alessandro Guerrieri, Fabio Giannetti, Giampiero Bertulli, Roberto Turatti, Susy Toma.

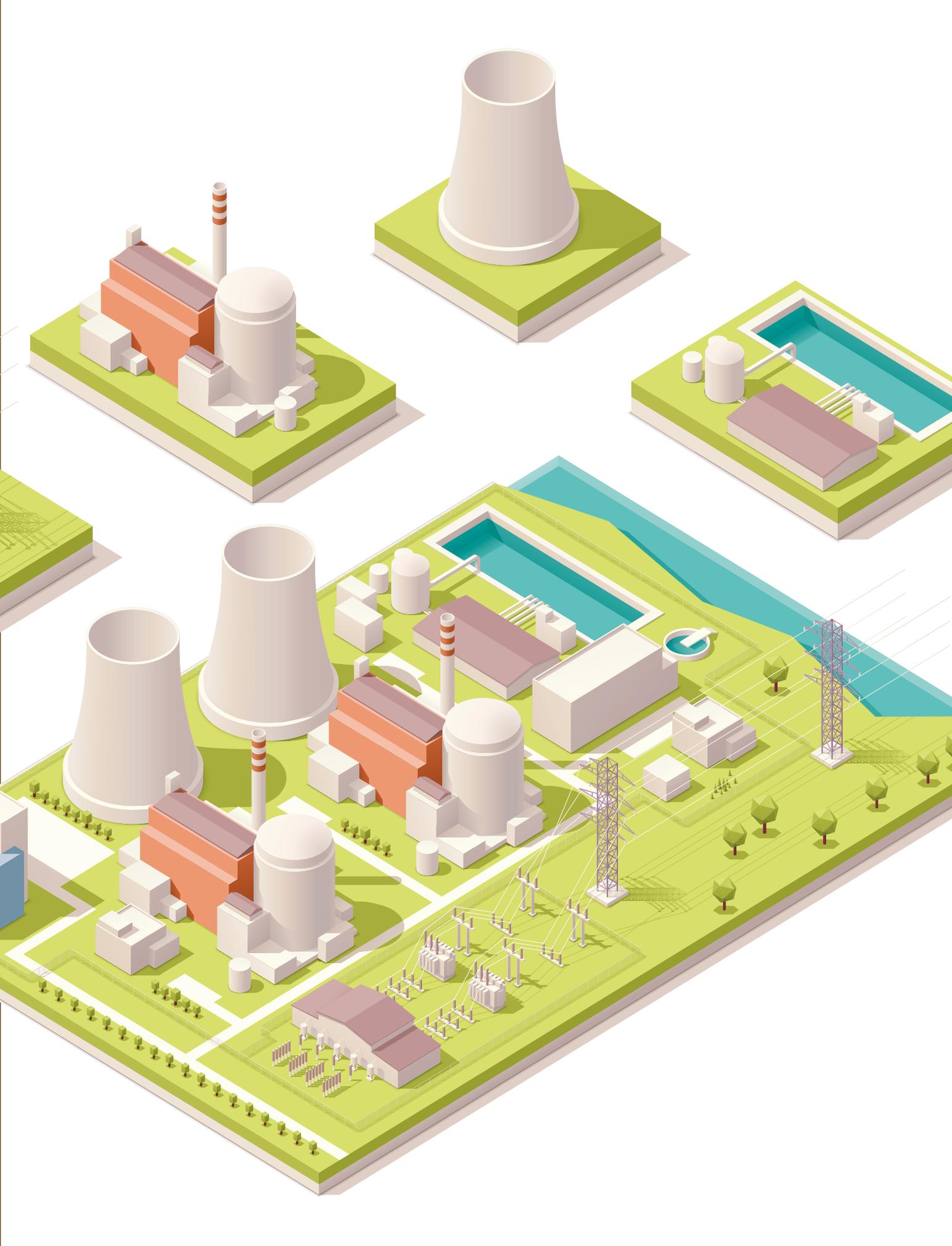
Un sentito ringraziamento all'Ing. Francesco Rizzo per il suo contributo al paragrafo 4.

Coordinamento generale: Ing. Massimo Sepielli

Coordinamento scientifico: Ing. Alessandra Di Pietro

Approvazione: Referente Area Nucleare, Ing. Alberto Taglioni

Validazione: Presidente dell'Ordine Ingegneri di Roma, Ing. Massimo Cerri

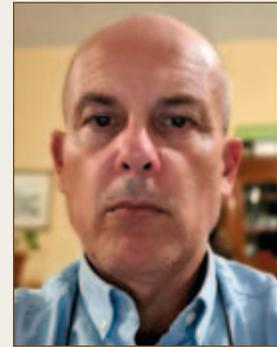




Ing. Alessandra Di Pietro
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Alessandro Guerrieri
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Andrea Tonti
Ingegnere Meccanico
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Antonio De Blasiis
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Fabio Giannetti
Ingegnere Energetico e Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Giampiero Bertulli
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Giancarlo Chiocchia
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Giorgio Giorgiantoni
Ingegnere Meccanico
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



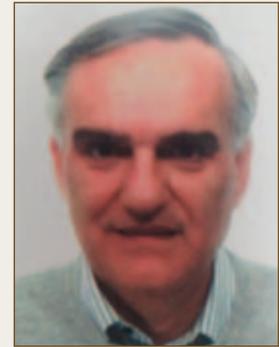
Ing. Giuseppe Canzone
Ingegnere Meccanico
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Massimo Sepielli
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Mauro Cappelli
Ingegnere Elettronico
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Mauro Olivetti
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Paolo Allievi
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Roberto Antonio Di Marco
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



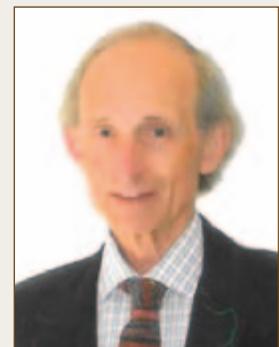
Ing. Roberto Turatti
Ingegnere Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Susy Toma
Ingegnere Energetico e Nucleare
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Tonino Palma
Ingegnere Meccanico e Aerospaziale
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Ing. Vittorio Violante Ruggi D'Aragona
Ingegnere Chimico
Commissione Ricerca e Reattori Innovativi



Quaderno

Direttrice responsabile

Marialisa Nigro

Direttrice editoriale

Maria Elena D'Effremo

Comitato di redazione**Sezione A**

Massimo Cerri

Silvia Torrani

Micaela Nozzi

Stefania Arangio

Fabrizio Averardi Ripari

Michele Colletta

Alessandro Fuschiotto

Marco Ghimenti

Giorgio Martino

Giovanni Nicolai

Paolo Reale

Mauro Villarini

Sezione B

Alfredo Simonetti

Amministrazione e redazione

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

Tel. 06 4879311 - Fax 06 487931223

Direttore creativo e progettazione grafica

Tiziana Primavera

Assistenza Editoriale

Leonardo Lavallo

Antonio Di Sabatino

Emanuela Cariani

Referente FOIR

Francesco Marinuzzi

Stampa

Press Up

Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma

www.ording.roma.it

segreteria@ording.roma.it

editoriale@ording.roma.it

Finito di stampare: maggio 2024

Il Quaderno IOROMA è una estensione alla rivista IOROMA

La Direzione rende noto che i contenuti, i pareri e le opinioni espresse negli articoli pubblicati rappresentano l'esclusivo pensiero degli autori, senza per questo aderire ad esse.

La Direzione declina ogni qualsiasi responsabilità derivante dalle affermazioni o dai contenuti forniti dagli autori, presenti nei suddetti articoli.



MISTO
Carta | A sostegno della
gestione forestale responsabile
FSC® C109382

GLI EDITORIALI

Il saluto del Presidente <i>di Massimo Cerri</i>	02
<i>L'Editoriale</i> <i>di Maria Elena D'Effremo</i>	04
<i>L'Editoriale</i> <i>di Alberto Taglioni</i>	06
<i>L'Editoriale</i> <i>di Massimo Sepielli</i>	08
<i>Gli autori</i>	10

INDICE

Introduzione	16
1 L'approccio ingegneristico per la realizzazione di un piano energetico con produzione di energia elettronucleare	20
2 Fabbisogno energetico e mix di produzione elettrica attuale	24
3 Piano energetico con produzione di energia elettronucleare	34
4 Tecnologie nucleari di pronto impiego	52
5 Criteri e requisiti per la localizzazione degli impianti nucleari sul territorio nazionale	66
6 Ricerca e Formazione	72
Conclusioni	75
Appendice	78

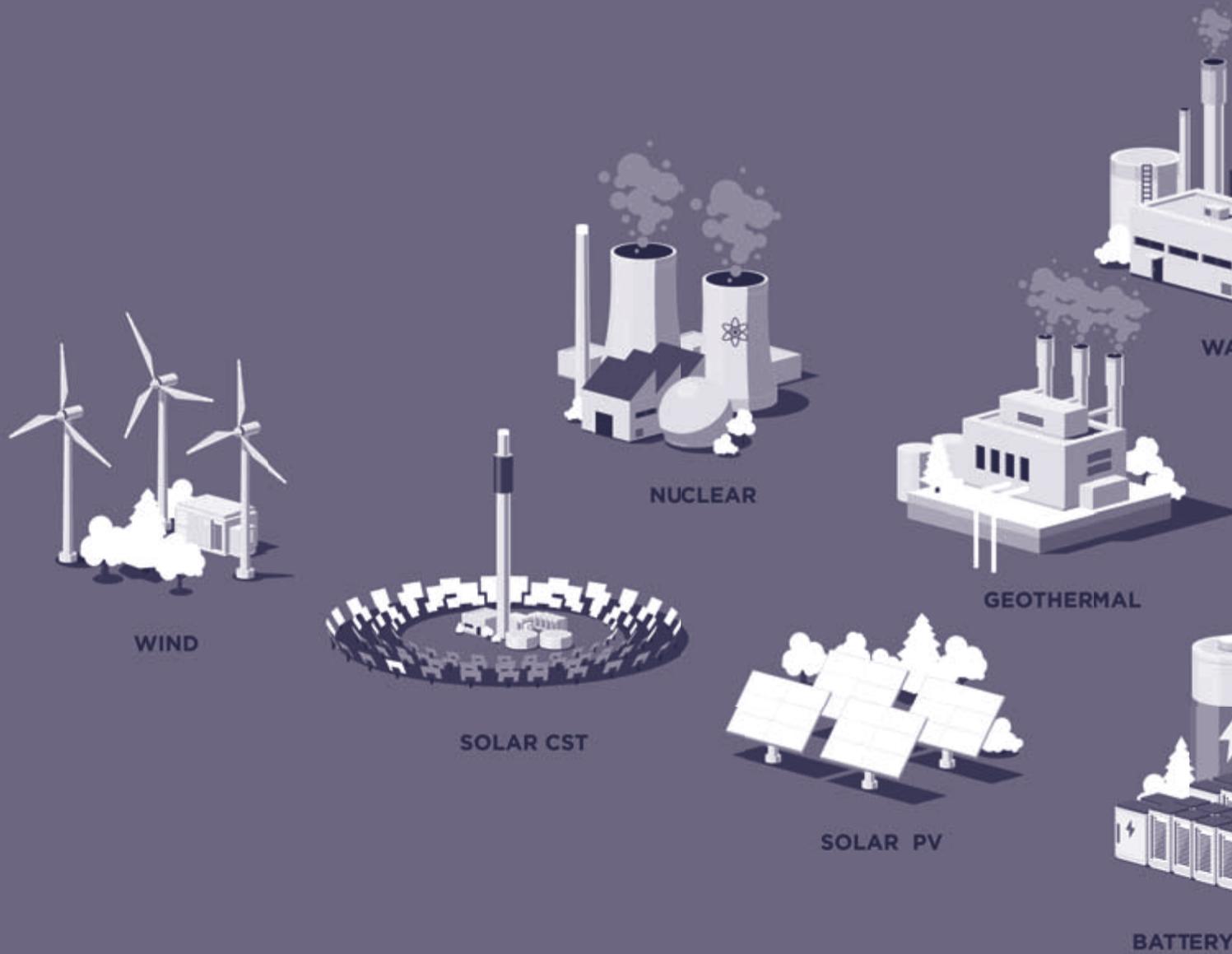
L'AREA WEB DEL QUADERNO E DELLA RIVISTA	108
--	------------

RAPPORTO SULLO SVILUPPO NUCLEARE ITALIANO NEL QUADRO DI UN MIX ENERGETICO OTTIMIZZATO

COMMISSIONE RICERCA E REATTORI INNOVATIVI



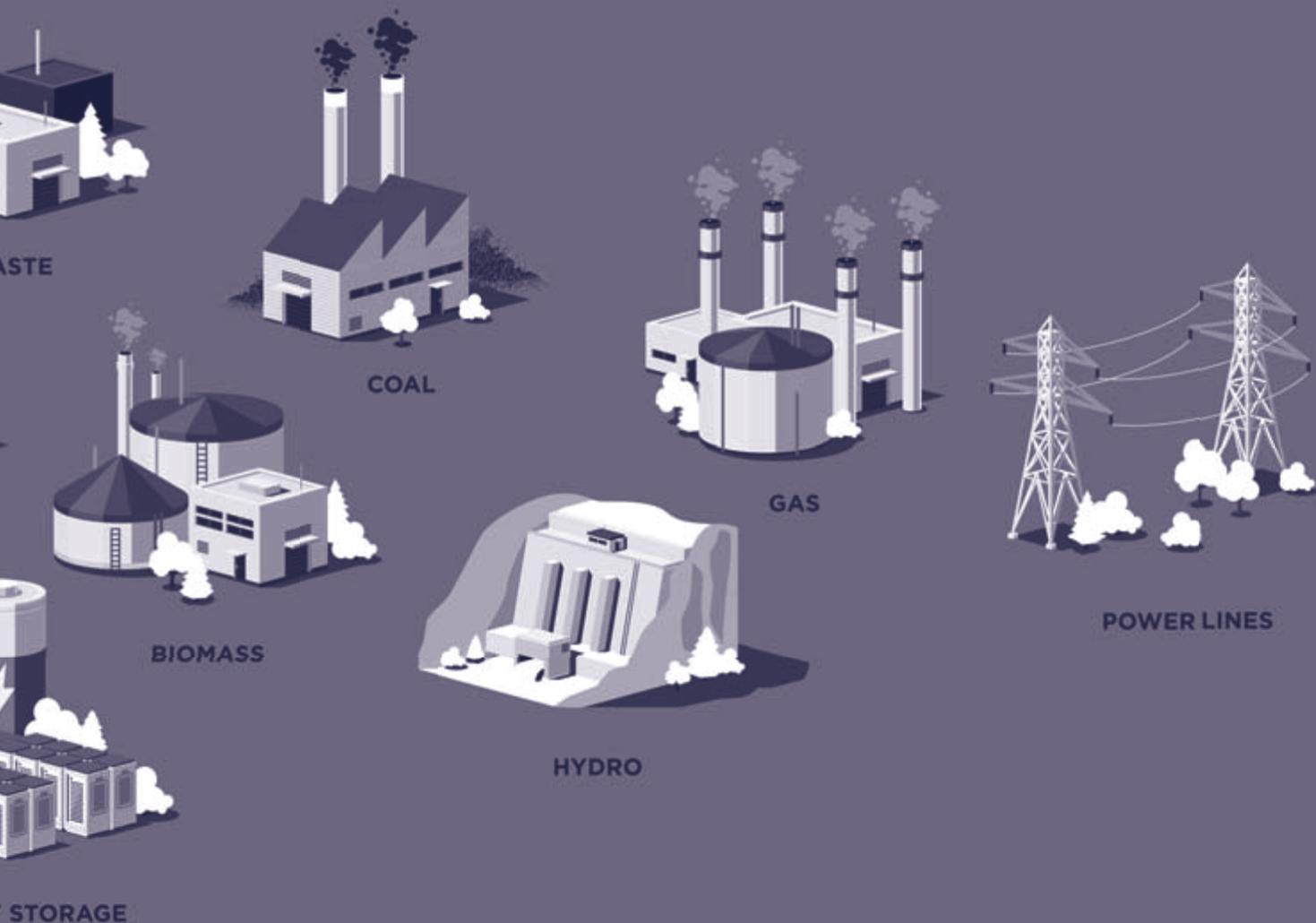




Introduzione

La Commissione Ricerca e Reattori Innovativi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, a seguito dell'emergenza energetica in cui versa il nostro Paese e del recente interesse mostrato a livello nazionale ed internazionale nei confronti dell'energia nucleare, ha ritenuto opportuno fornire un supporto tecnico scientifico allo scopo di indicare possibili soluzioni da attuare nel breve e medio periodo per attenuare nell'immediato e risolvere in un futuro prossimo, le criticità in campo energetico ed ambientale. La Commissione, da anni impegnata nell'appro-

fondimento della crisi energetica italiana attraverso studi tecnico-normativi, oggetto di Seminari e Convegni, ha prodotto il presente Rapporto su un possibile sviluppo del nucleare italiano per la produzione di energia elettrica da fissione, nel quadro di un mix energetico equilibrato e diversificato tecnologicamente e geograficamente. Il Rapporto ha l'obiettivo di fornire i principi ingegneristici necessari per realizzare un piano energetico ottimizzato, che tenga conto delle esigenze del territorio, del crescente fabbisogno energetico, della salvaguardia dell'ambiente, del contenimento dei prezzi e dello sviluppo economico e sociale. Lo studio è stato condotto da un gruppo di lavoro

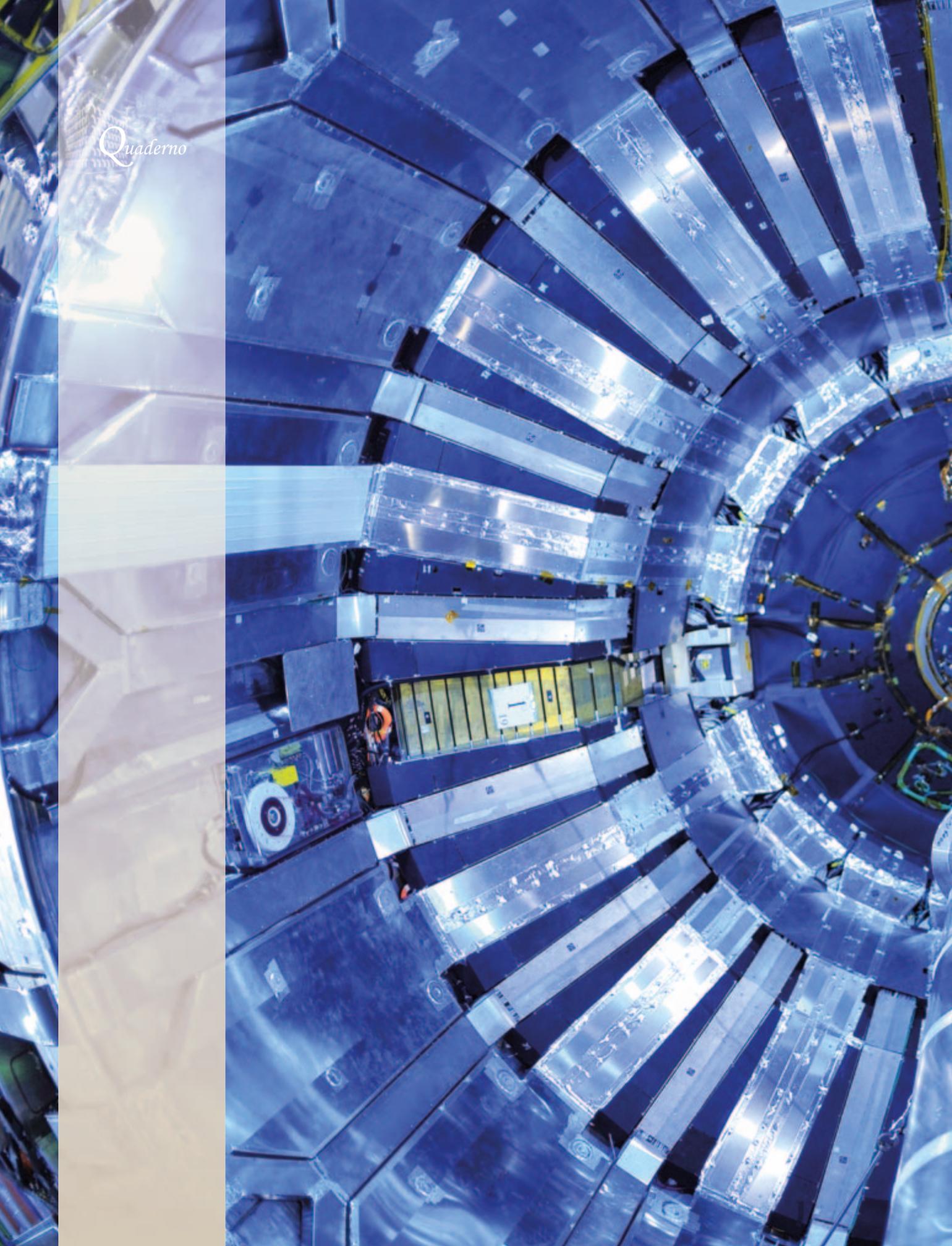


ro di Ingegneri componenti della Commissione, esperti attivi nel settore dell'energia nucleare, che grazie alla loro conoscenza e competenza, hanno offerto il loro contributo tecnico per lo sviluppo di una proposta di impiego sul territorio nazionale di una filiera di reattori di potenza per la produzione di energia termonucleare da fissione. Il Rapporto è stato realizzato in breve tempo, in considerazione dell'emergenza attuale, in forma sintetica e il più possibile fruibile anche da un pubblico di non addetti ai lavori, e va considerato un documento di sintesi, aperto, che si propone di integrare ed aggiornare ulteriori approfondimenti tecnici e informazioni.

Nel seguito verranno illustrati i criteri da adottare nell'ipotesi di un impiego, nel breve-medio periodo, della tecnologia nucleare per la produzione di energia elettrica, la stima del suo contributo nel mix energetico totale e le azioni eventualmente necessarie da intraprendere per la implementazione del piano energetico proposto.

Il Rapporto si completa di un'appendice con quattro allegati tecnici nei quali vengono approfonditi gli aspetti della sicurezza nucleare e della radioprotezione e proposti un metodo di analisi per il supporto alla scelta della tecnologia e una valutazione dei costi-benefici di un impianto nucleare full scale.

Quaderno





**1. L'APPROCCIO INGEGNERISTICO
PER LA REALIZZAZIONE DI UN
PIANO ENERGETICO CON PRODUZIONE
DI ENERGIA ELETTRONUCLEARE
NEL CONTESTO INTERNAZIONALE**

L'aumento esponenziale della popolazione umana, che alcune stime indicano in 9,687 miliardi¹ entro il prossimo 2050², associato ad una globalizzazione spinta e ad una accelerata evoluzione delle nuove tecnologie, che aiutano e stimolano la crescita del benessere, richiedono una sempre più massiccia quantità di energia la cui disponibilità, geografica e temporale, non sempre risulta essere certa e costante, e soprattutto economica, almeno per quanto riguarda il nostro Paese. Questa situazione non consente di scartare a priori alcuna opzione energetica, tantomeno quella energy-intensive e decarbonizzata della fonte nucleare da fissione.

L'attuale situazione geopolitica, che ha contribuito ad un rialzo dei prezzi del gas e del petrolio con la conseguente ripercussione sui costi delle materie prime, ha reso evidente l'intrinseca debolezza del nostro Paese nel campo energetico, che si è manifestata con una forte dipendenza energetica da altri Paesi, in particolare per quanto riguarda il gas.

È importante, dunque, che strutture qualificate, tra cui le Università, gli Enti di Ricerca e l'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma con la sua Area Nucleare, rendano disponibili, in modo trasparente, tutti i dati e le conoscenze che "descrivono" l'utilizzo dell'energia nucleare in campo civile e il suo impatto positivo nell'economia e per il benessere della società civile.

In particolare, l'Ingegnere può essere il giusto interprete della progettazione e della attuazione della transizione energetica del Paese e, attraverso i suoi progetti energetici, promotore dell'uso delle più appropriate tecnologie come, nella fattispecie,

quella nucleare per la produzione termoelettrica massiva, per la produzione di idrogeno (anche con funzione di accumulo) per via termochimica o elettrochimica, e per l'integrazione con sistemi di produzione di elettricità mediante l'uso di fonti rinnovabili integrative (eolico, solare, ecc.).

L'obiettivo e lo spirito del presente lavoro è quello di fornire un contributo qualificato a tutte le Parti interessate, affinché si possa definire, con elementi certi e verificati, una strategia energetica efficace e funzionale, con una visione strutturale ad ampio respiro, per poter sviluppare una realistica transizione verso una produzione energetica decarbonizzata e a bassa emissione di inquinanti³, sicura e meno dipendente dai fornitori e dai mercati esteri.

La visione deve essere pragmatica e strategica, di medio-lungo periodo e deve portare ad affrontare in maniera sistemica le problematiche connesse, considerando le implicazioni di carattere tecnologico, sociale ed economico. L'arco temporale interessato deve essere superiore almeno ai tempi di realizzazione di una centrale nucleare, equivalente, in teoria, a cinque-sette anni.

Con riferimento al tema "energia ed ambiente", l'attuale contesto geopolitico globale ha evidenziato l'importanza di un sistema energetico resiliente, il più possibile decarbonizzato e, soprattutto, autonomo, che possa garantire, per i cittadini e le imprese, sia la sicurezza dell'approvvigionamento di energia a prezzi accessibili per tutti, sia un uso più efficiente delle risorse naturali.

Come evidenziato da uno degli ultimi rapporti pubblicati dalle Nazioni Unite sul divario delle emissioni nel 2022, infatti, le attuali politiche



non si sono dimostrate sufficienti per raggiungere gli obiettivi dell'Accordo di Parigi del 12 dicembre 2015.

È necessaria, allora, una trasformazione a livello di sistema per garantire l'effettiva e duratura riduzione delle emissioni.

In tale contesto, la reintroduzione del nucleare nel nostro Paese, nell'ambito di un mix energetico equilibrato e funzionale e di nuove politiche di sviluppo economico, potrebbe rappresentare un aiuto considerevole per il raggiungimento di tali obiettivi.

L'Unione europea (UE), peraltro, ha inserito, il 6 luglio 2022, l'energia nucleare nella Tassonomia degli investimenti ritenuti sostenibili e a basso impatto ambientale.

Tali evidenze dovrebbero essere prese in considerazione al fine di migliorare la sicurezza energetica, di ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e di garantire una transizione equa e conveniente verso un'economia a basse emissioni di anidride carbonica (CO₂) e di inquinanti direttamente immessi in atmosfera, che salvaguardi posti di lavoro, promuovendo benessere e crescita economica.

Nel predisporre un piano energetico nazionale integrato che preveda l'utilizzo dell'energia nucleare da fissione non si può prescindere dal considerare il ruolo dell'Ingegnere.

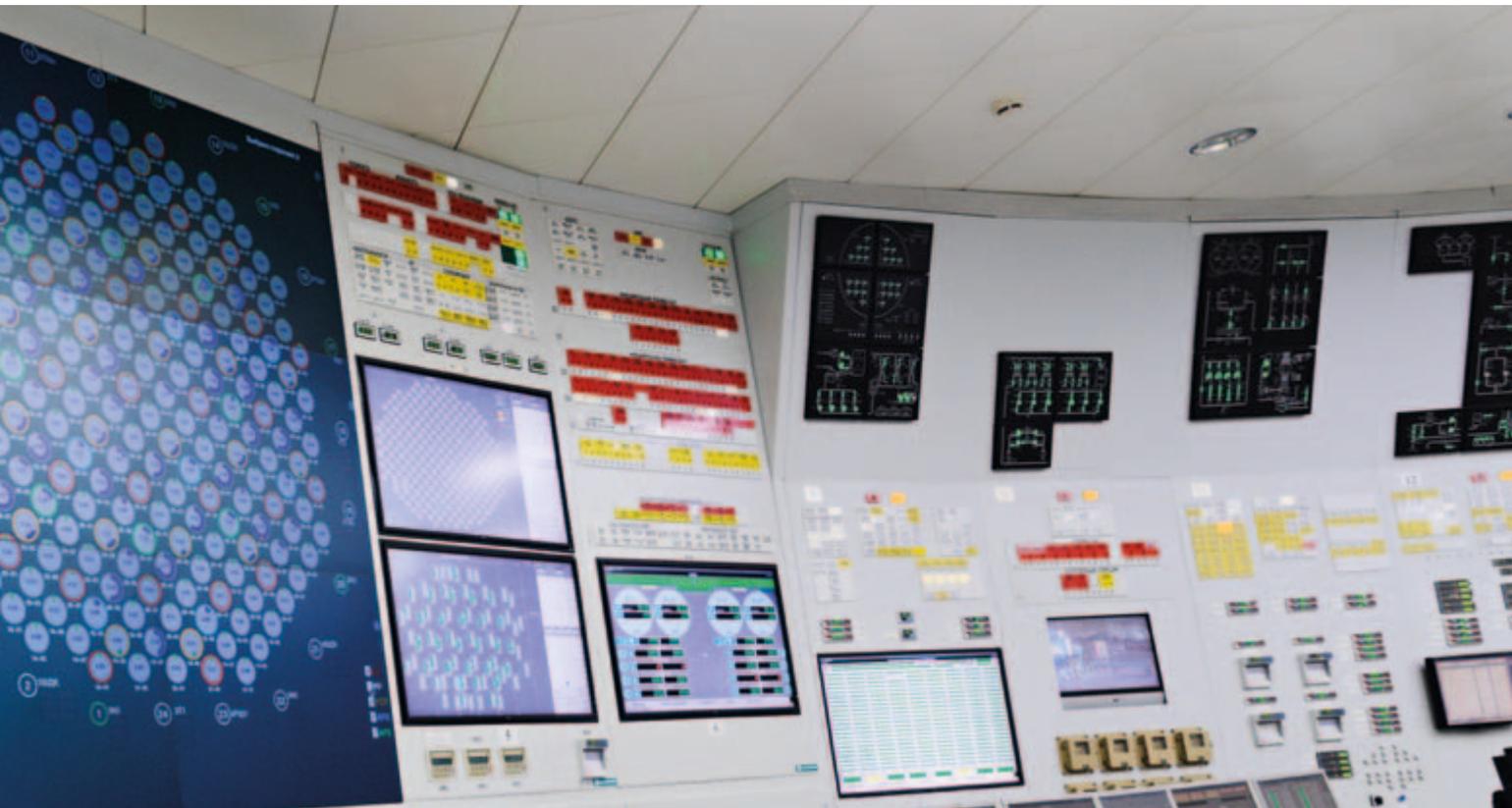
Le valutazioni alla base, infatti, partono da dati e competenze tecniche, fisico-matematiche, nucleari, chimiche, tecnologiche, ed includono anche quelle inerenti alla comprensione del bilancio costi-benefici e del contesto ambientale e socioculturale.

A tal riguardo, devono essere eseguite, in primo luogo, un'analisi capillare dei dati di consumo e di produzione e una stima del fabbisogno energetico attuale e in divenire, utili per fare una valutazione di sostenibilità ambientale comparata delle fonti nel breve, medio e lungo termine e in relazione all'evoluzione tecnologica.

Da queste valutazioni e da un'analisi tecnica del territorio, delle sue caratteristiche e delle sue potenzialità tecnologiche, possono scaturire le scelte progettuali volte alla realizzazione degli impianti per la produzione di energia termoneucleare ovvero dell'intero processo tecnologico caratteristico di questa tecnologia, pianificato in sede di progettazione in tutte le sue fasi: dal ciclo combustibile, alla fase di esercizio e manutenzione, al deposito per i rifiuti radioattivi con annesso parco tecnologico.

Accanto a queste considerazioni tecnico-scientifiche devono essere presi in esame gli aspetti economici e di positiva ricaduta sul sistema industriale derivanti dall'utilizzo dell'energia nucleare attraverso uno studio dei benefici che il suo contributo può offrire al nostro Paese nel medio e lungo termine.

Deve seguire, poi, un'analisi del contesto legislativo e normativo a livello internazionale, nazionale e locale e dei relativi aspetti riguardanti la salute e la sicurezza, quest'ultimi pienamente supportati dalla scienza della radioprotezione. Si ritiene, infine, fondamentale, promuovere campagne informative al pubblico sulla tematica, da parte di Ingegneri esperti nel settore, al fine di generare un coinvolgimento attivo e trasparente della popolazione.





2. FABBISOGNO ENERGETICO E MIX DI PRODUZIONE ELETTRICA ATTUALE



La situazione energetica nel mondo

Gli usi energetici mondiali mostrano, interrotti solo da crisi energetiche contingenti dovute a circostanze limitate nel tempo, un continuo andamento ascensionale, sincrono con l'andamento del prodotto interno lordo mondiale.

Tale crescita è valutata in qualche punto percentuale annuo positiva.

Dai grafici nelle Figure 1 e 2, si evince che i combustibili fossili rappresentano ancora la fon-

te principalmente utilizzata per la produzione di energia primaria⁴ (termica ed elettrica), e in modo preponderante nell'area geografica Asia Pacifico. L'Europa, ormai, rappresenta solamente il 13,8% degli impieghi mondiali.

Il petrolio rimane la fonte energetica primaria nel settore dei trasporti, ma, come mostra il grafico in Figura 3, subisce un sensibile calo pur rappresentando nel 2021 il 30% dei consumi di energia.

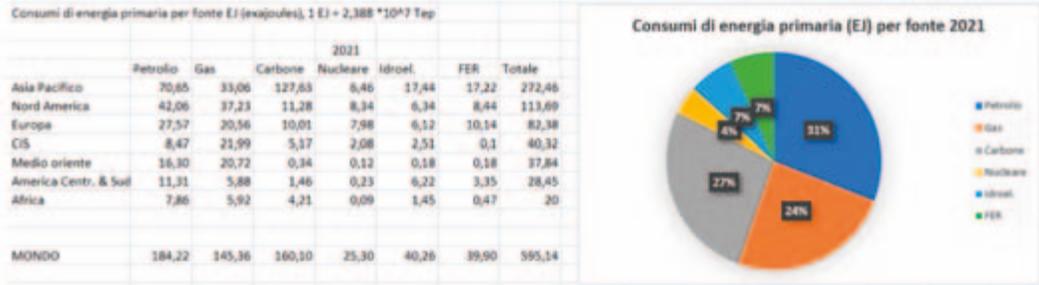


Figura 1 - Fonte: elaborazioni bp Statistical Review of World Energy 2022 71st edition

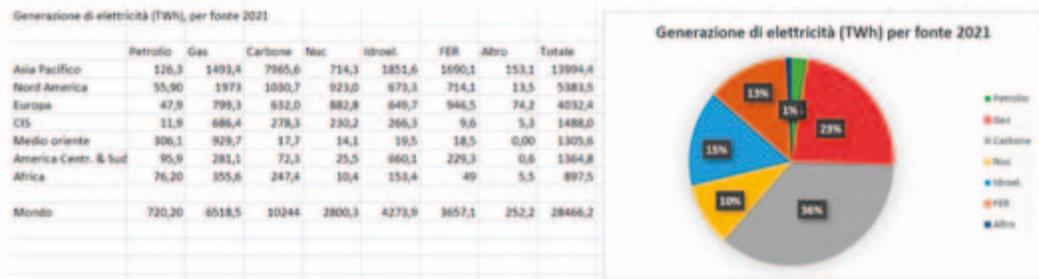


Figura 2 - Fonte: elaborazioni bp Statistical Review of World Energy 2022 71st edition

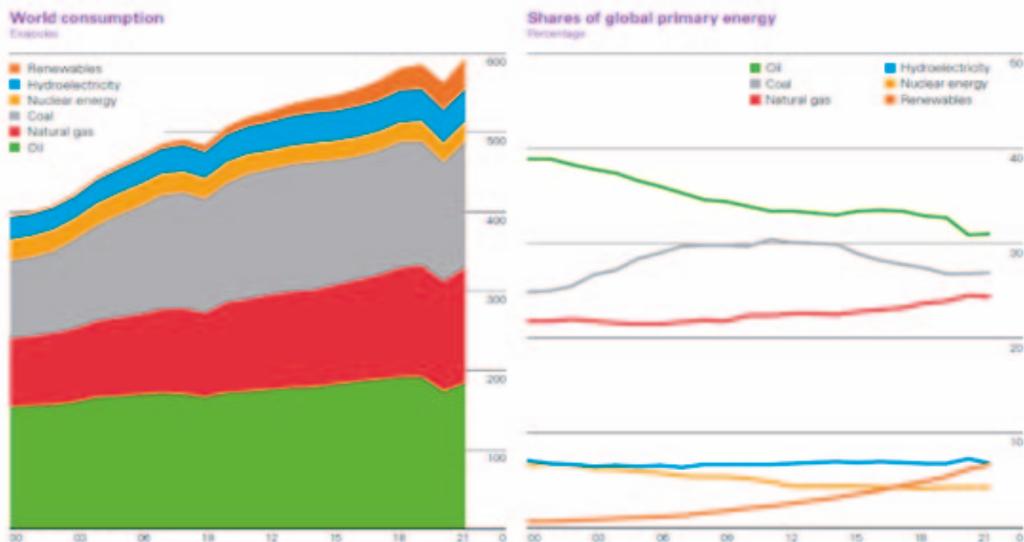


Figura 3 - Fonte: elaborazioni bp Statistical Review of World Energy 2022 71st edition

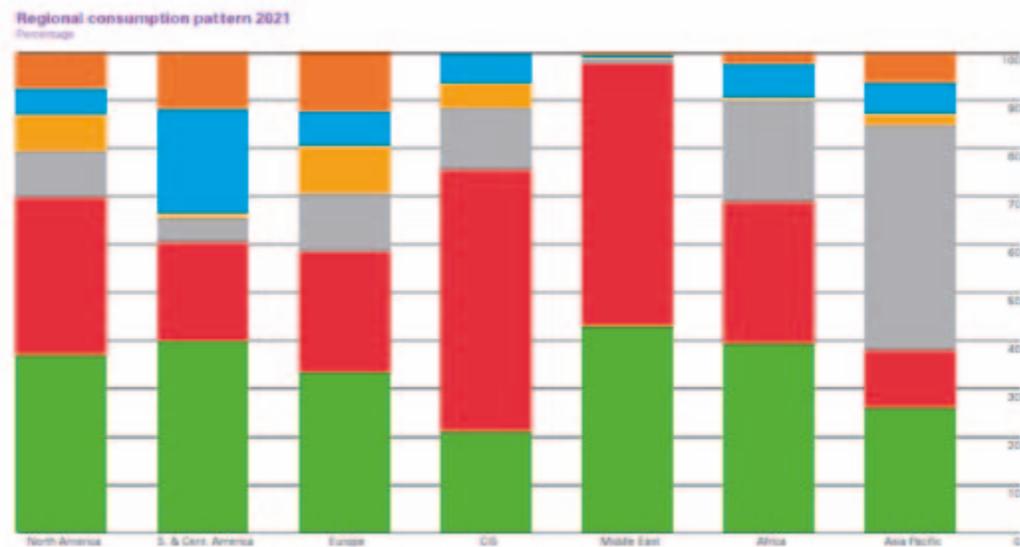


Figura 4 - Fonte: elaborazioni bp Statistical Review of World Energy 2022 71st edition

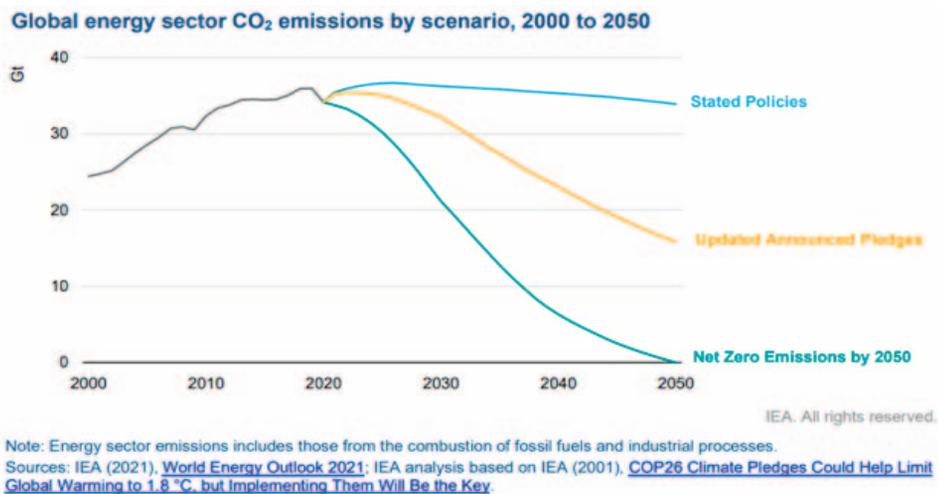


Figura 5 - Fonte: IEA

Per quanto riguarda il carbone, a partire dall'inizio degli anni 2000, si nota un andamento stazionario dovuto soprattutto allo sviluppo dell'Indo-pacifico e degli altri Paesi emergenti e ad oggi è intorno al 30% del totale.

Il gas naturale risulta in ascesa fino a rappresentare il 24% del totale.

La generazione di energia da idroelettrico rimane stazionaria, negli ultimi anni, così come quella da nucleare in quanto alcuni impianti sono fermi in attesa di essere sostituiti.

Si evidenzia, infine, un andamento ascensionale delle fonti rinnovabili che arrivano all'8% del totale. È importante sottolineare, poi, che i consumi energetici, come mostra il grafico in Figura 4, risultano

legati alle peculiarità di ogni singolo Paese.

Le previsioni dei consumi energetici mondiali per i prossimi anni vengono periodicamente elaborate da Istituti internazionali di provata credibilità ed autonomia. Fra questi, si ritiene utile citare l'autorevole fonte dell'Agenzia Internazionale dell'Energia⁵ (AIE - International Energy Agency, IEA).

Nello scenario delle politiche dichiarate⁶ (STEPS – Stated Policies Scenario) pubblicato dall'AIE, che si basa sulle ultime decisioni politiche assunte a livello mondiale, le emissioni di CO₂ relative all'energia sono rimbalsate a 36,6 gigatonnellate⁷ (Gt) nel 2021, il più grande incremento annuale mai registrato.

	Electricity Generation (TWh)					Shares (%)				CAAGR (%)		
	2019	2020	2030	2040	2050	2020	2030	2050	2020-2030	2020-2050		
Total gener	26 922	26 778	37 316	56 553	71 164	-	100	100	100	-	3,4	3,3
Renewable	7 153	7 660	22 817	47 521	62 333	-	29	61	88	-	12	7,2
Solar PV	665	821	6 970	17 031	23 469	-	3	19	33	-	24	12
Wind	1 423	1 592	8 008	18 787	24 785	-	6	21	35	-	18	9,6
Hydro	4 294	4 418	5 870	7 445	8 461	-	17	16	12	-	2,9	2,2
Bioener gy of which	665	718	1 407	2 676	3 279	-	3	4	5	-	7,0	5,2
BECCS	-	-	129	673	842	-	-	0	1	-	n.a.	n.a.
CSP	14	14	204	880	1 386	-	0	1	2	-	31	17
Geother mal	92	94	330	625	821	-	0	1	1	-	13	7,5
Marine	1	2	27	77	132	-	0	0	0	-	28	14
Nuclear	2 792	2 698	3 777	4 855	5 497	-	10	10	8	-	3,4	2,4
Hydrogen-t	-	-	875	1 857	1 713	-	-	2	2	-	n.a.	n.a.
Fossil fuels	1	4	459	1 659	1 332	-	0	1	2	-	61	22
Coal with CCUS	1	4	289	966	663	-	0	1	1	-	54	19
Natural gas with CCUS	-	-	170	694	669	-	-	0	1	-	n.a.	n.a.
Unabated f	16 941	16 382	9 358	632	259	-	61	25	0	-	-5,4	-13
Coal	9 832	9 426	2 947	0	0	-	35	8	0	-	-11	-40
Natural gas	6 314	6 200	6 222	626	253	-	23	17	0	-	0,0	-10
Oil	795	756	189	6	6	-	3	1	0	-	-13	-15

Tabella 1 - Net Zero by 2050, IEA, Paris - Fonte: International Energy Agency (2021)

In questo stesso scenario arrivano a raggiungere 32 Gt nel 2050.

Nello Scenario degli impegni annunciati⁸ (APS - Announced Pledges Scenario), che delinea un percorso in cui gli impegni dei governi devono attuarsi, il picco delle emissioni, si colloca a metà degli anni 20 e decresce a 12 Gt nel 2050. Nello scenario che prevede emissioni zero entro il 2050 (NZE - Net-Zero Emissions by 2050 - IEA), le emissioni di CO₂ scendono a 23 Gt nel 2030 ed a zero nel 2050.

Nella Figura 5 il grafico rappresentativo di tali proiezioni.

Il nucleare ha contribuito in misura considerevole al rallentamento delle emissioni di CO₂ dagli anni 70 e circa 66 Gt di CO₂ sono state evitate globalmente dal 1971.

Senza il contributo del nucleare, le emissioni totali generate dalla produzione di energia elettrica sarebbero state del 20% più alte, per un totale del 6% su tutti gli usi energetici.

L'85% di tutte queste emissioni evitate si concentra nelle economie avanzate.

La mancanza di nuove installazioni ha causato negli anni recenti una forte contrazione nella capacità produttiva che declina del 5% fra il 2020 e il 2030.

Nello scenario NZE (Tabella 1) il nucleare avrà una forte crescita nelle economie avanzate.

Un rinnovato sforzo costruttivo, tuttavia, provocherà un rimbalzo della capacità produttiva a 330 gigawatt (GW)⁹ nel 2050, il 10% al di sopra del livello corrente e del 50% al di sopra di quello già evidenziato dallo STEPS.

Questa crescita accelererà la decarbonizzazione della fornitura di elettricità, diversificherà il mix energetico, migliorerà la stabilità della rete e garantirà nel lungo termine un ruolo importante per il nucleare nelle economie avanzate.

In questo stesso scenario, la capacità produttiva da fonti rinnovabili crescerà di cinque volte.

Un minor ricorso alla fonte nucleare per la produzione di energia renderebbe le ambizioni per il traguardo delle zero emissioni per il 2050 più impervio e più costoso.

L'utilizzo dell'energia nucleare sarà, poi, ulteriormente implementato dalla futura disponibilità e dall'impiego dei reattori di quarta generazione, progettati per la sostenibilità a lungo termine e dei reattori modulari di piccola taglia, gli Small Modular Reactors (SMR), progettati per una più semplice integrazione sul territorio e per la co-generazione energetica.

La situazione energetica italiana

Dalla relazione annuale del Ministero della Transizione Ecologica (ora Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica) sulla situazione energetica del Paese, basata sui dati del 2021, si rileva che la domanda primaria di energia è stata pari a 153 milioni di tonnellate equivalenti di petrolio (Mtep), con un aumento del 6,2% rispetto all'anno precedente.

La dipendenza energetica dall'estero, calcolata come percentuale del fabbisogno energetico nazionale soddisfatto con le importazioni nette, è ulteriormente aumentata dal 73,5% del 2020 al 74,9% del 2021.

La produzione nazionale di fonti energetiche, pari a 36,4 Mtep, è, invece, diminuita del 3,4% rispetto all'anno precedente.

L'approvvigionamento energetico del Paese è costituito per il 40,9% dal gas naturale, per il 32,9% dal petrolio e per il 19,5% dalle fonti energetiche rinnovabili (FER).

Gli impieghi finali di energia sono aumentati dell'11,4%; in particolare i trasporti segnano un aumento del 22,1%, l'industria del 6,7% e altri settori del 7,4%.

La domanda di energia elettrica nel 2021 è stata pari a circa 320 TWh¹⁰, facendo registrare un incremento del 6,2% rispetto all'anno precedente



Figura 6 - Evoluzione e copertura del fabbisogno di energia elettrica - Fonte: TERNA

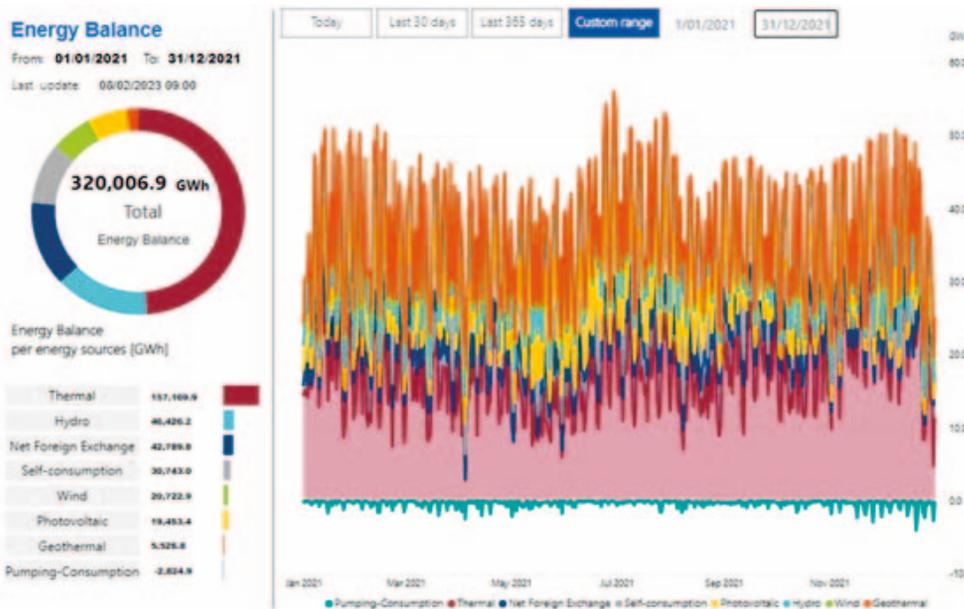


Figura 7 - Bilancio energetico nazionale anno 2021 - Fonte: IERNA

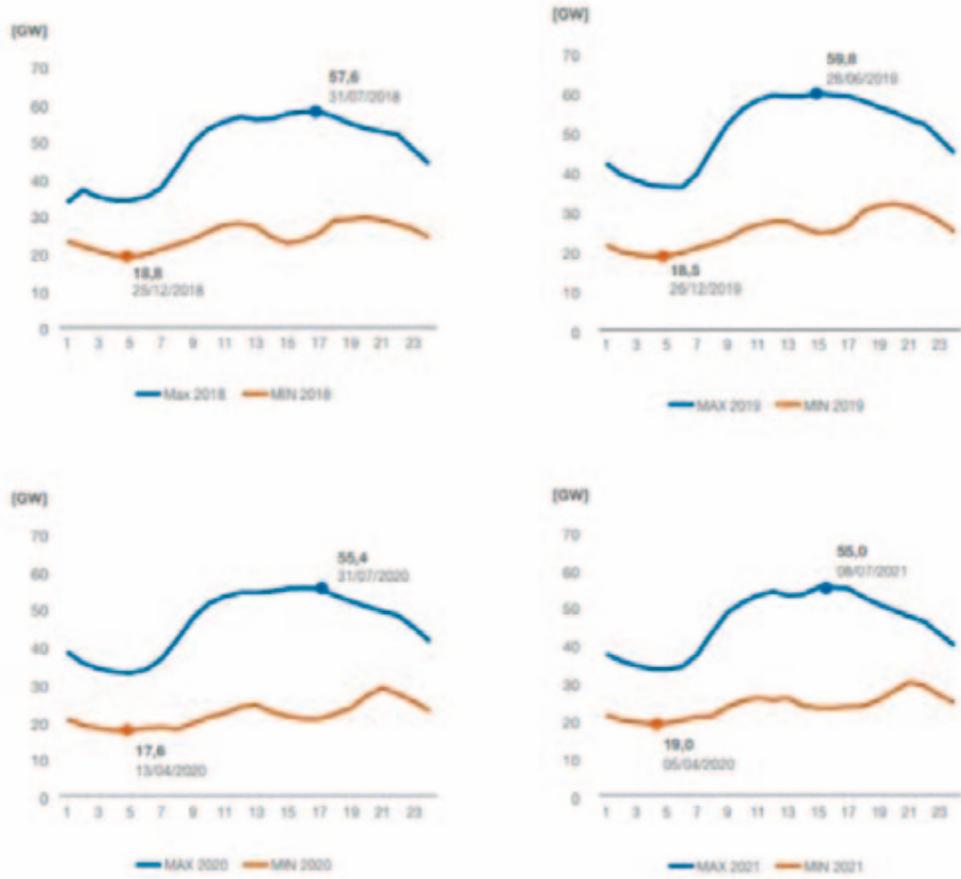


Figura 8 - Curve di carico giornaliera dal 2018 al 2021 - Fonte: TERNA

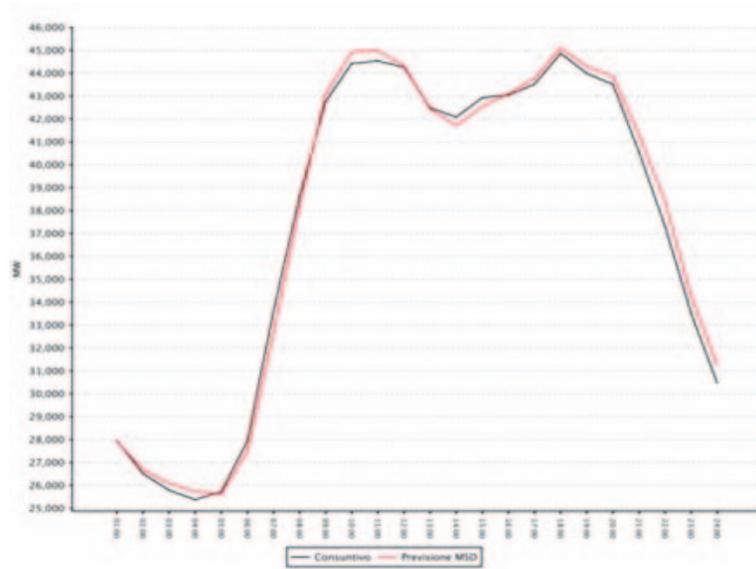


Figura 9 - Curva di carico giornaliera - Fonte: TERNA

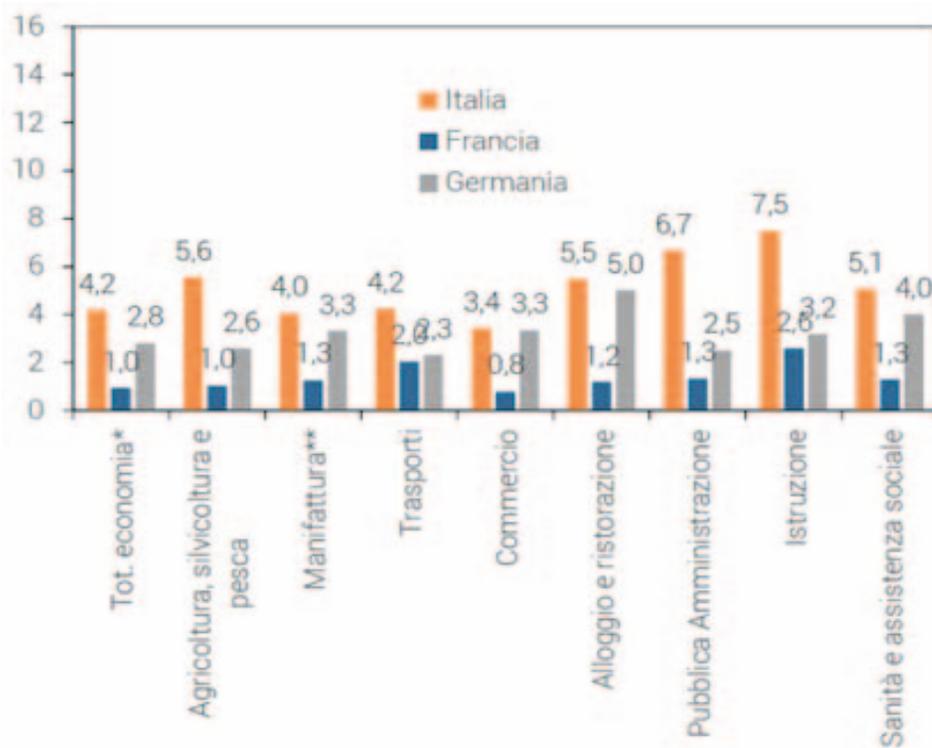


Figura 10 - Variazione dell'incidenza dei costi energetici sul totale dei costi di produzione, 2022 vs. media 2018-19 - FONTE: Confindustria

come mostra il grafico in Figura 6. Questa domanda di energia elettrica è stata soddisfatta per l'86,6% da produzione nazionale destinata al consumo, per un valore di 277,1 terawattora (TWh) (+3,0%) e per la quota restante (13,4%) dalle importazioni nette dall'estero per un ammontare di 42,8 TWh, in aumento del 32,9%, rispetto al 2020.

La produzione nazionale lorda di energia elettrica nel 2021 è stata pari a circa 289 TWh, registrando un +3,0% rispetto al 2020 e, come evidenzia il grafico in Figura 7, è stata coperta per il 59,0% dalla fonte termoelettrica non rinnovabile, per il 16,4% dalla produzione idroelettrica e per il restante 24,6% dalle fonti eolica, fotovoltaica, geotermica e bioenergie.

La potenza efficiente lorda installata al 31 dicembre 2021 è risultata pari a 119,9 GW; 61,9 da termoelettrico, 19,2 GW da idroelettrico ed il restante 38,8 GW dalle altre fonti rinnovabili interrompibili (22,6¹¹ GW da fotovoltaico, 11,3¹² GW da eolico, 4,1¹³ GW bioenergie e 0,8 GW¹⁴ geotermico).

La forte differenza fra potenza installata ed energia prodotta è determinata dal fattore di carico/ore di produzione che per alcune fonti è particolarmente penalizzante.

Dall'analisi dei punti di massimo e di minimo

delle curve che, nei grafici in Figura 8, rappresentano le richieste di carico giornaliere (curve di carico), si evidenzia, nel 2021, una diminuzione del punto di massimo rispetto al 2019 (periodo di pre-pandemia) di circa il 9% e valori sostanzialmente in linea per il 2020 e 2021.

La curva di carico tipica giornaliera riportata nella Figura 9 mostra, invece, la precisione dei dati di previsione rispetto al consuntivo e le ore giornaliere di maggior richiesta di carico.

Emerge, dall'analisi dei dati mostrati nel grafico in Figura 10, relativi all'aumento dei costi energetici per i diversi comparti, che il sistema-Italia, nel complesso, risulta essere quello più colpito in Europa a causa dell'innalzamento dei costi delle materie prime a livello globale.

L'incidenza dei costi energetici sui costi di produzione in Italia risulta, infatti, essere troppo elevata.

Questa debolezza si spiega, soprattutto, analizzando il mix energetico italiano fortemente sbilanciato sul gas (si veda la Tabella 2) che, con gli abnormi rincari del 2022 ed i rischi di carenza sulle forniture, sta determinando un pesantissimo impatto sull'economia italiana.

Nel nostro Paese, la liberalizzazione del mercato elettrico, la costruzione di cicli combinati a gas per la generazione di energia elettrica,

la diminuzione dei contratti a lungo termine, le enormi variazioni dei prezzi del gas in atto con il conseguente rialzo dei prezzi dell'energia elettrica, stanno provocando un impatto proporzionalmente maggiore per le filiere industriali italiane rispetto a quelle tedesche e francesi. In merito ai costi di produzione, dalle stime effettuate ad ottobre 2022 da Confindustria sui due scenari ipotetici mostrati nel grafico della Figura 11, si evidenzia come i costi energetici possano incidere sul totale dei costi di produzione dell'economia italiana dall'11% nel 2022 fino al 14,6% nel 2023 partendo da un 4,6% in periodo di pre-pandemia (incidenza circa doppia di quella francese). Per quanto riguarda il settore della manifattura, tale incidenza potrebbe triplicarsi rispetto al 3,9% del periodo pre-crisi, passando da un 10,2% nel 2022 al 13,7% nel 2023.

I rincari dell'energia elettrica e del gas naturale rischiano, evidentemente, di mettere in crisi i vari comparti industriali. Nel corso del 2021 il prezzo dell'energia elettrica in Italia è passato da circa 50 €/MWh¹⁵ a 200 €/MWh e anche il prezzo del gas è salito da circa 20 €/MWh a quasi 80 €/MWh: un aumento del 300%. Nel 2022 i prezzi di elettricità e gas hanno continuato a gonfiarsi con un ulteriore +200% e fino alla fine del 2022 l'incremento è stato dell'1.497,8% rispetto ai prezzi di febbraio 2020 (periodo di pre-pandemia): in altri termini, siamo a 15 volte il prezzo di allora. L'abnorme rincaro del gas e i rischi di carenza di approvvigionamento stanno avendo un impatto pesante sull'Italia e gli altri Paesi europei, importatori di gas. L'Italia, tuttavia, è certamente il Paese maggior-

		Fonti fossili			Fonti alternative	
		Combustibili solidi**	Petrolio	Gas naturale	Nucleare	Rinnovabili e biocarburanti
Settore Energia	Italia	7%	7%	49%	0%	37%
	Germania	44%	1%	15%	17%	23%
	Francia	2%	1%	4%	83%	10%
Manifattura*	Italia	4%	16%	76%	0%	4%
	Germania	11%	12%	68%	0%	10%
	Francia	7%	17%	67%	0%	9%

* Manifattura non comprende il settore della raffinazione petrolifera.

** Carbone e derivati.

Tabella 2 - Valori % sul totale del consumo, 2019
Fonte: elaborazioni Centro Studi Confindustria su dati Eurostat



Figura 11 - Elaborazioni CSC su dati OECD, Thomson Reuters - Fonte: Eurostat.

mente penalizzato da questi fattori contingenti e, più degli altri, sta riducendo l'export e deprimendo la produzione industriale fortemente condizionata dall'incertezza del mercato, dall'oscillazione dei prezzi delle materie prime e dalla possibile carenza delle stesse. Nella Tabella 3, a supporto di quanto si è evi-

denziato, vengono mostrati i consumi mensili regionali per quanto riguarda il settore industriale nel periodo estivo per evidenziare la differenza dei consumi tra le varie regioni e i bilanci negativi dovuti al calo di produzione industriale. Si riporta, invece, nella Tabella 4 la produzione di energia elettrica per regione relativa all'anno 2021.



Tabella 3 - Consumi mensili regionali del settore industriale nel periodo estivo - Fonte: TERNA

Fonte TERNA S.P.A. - Produzione di energia elettrica per Regione (GWh) - Anno 2021								Produzione-Consumi	Totale Consumi x Regione
	Totale	Eolico	Fotovoltaico	Geotermico	idroelettrico	Termoelettrico	% sul totale ITALIA		
ABRUZZO	6397,8	410,2	945,5	0,0	1183,8	3858,3	2,3%	235,7	6158,1
BASILICATA	3788,3	2423,0	481,3	0,0	189,0	685,0	1,4%	1042,5	2745,8
CALABRIA	16679,8	2132,4	681,3	0,0	883,0	12963,1	5,9%	11694,4	5045,4
CAMPANIA	11743,4	3209,2	981,5	0,0	844,0	6708,7	4,2%	-4742,8	16486,2
EMILIA-ROMAGNA	23491,4	71,3	2401,6	0,0	966,5	20052,0	8,4%	-4421,2	27912,6
FRIULI-VENEZIA GIULIA	7836,7	0,0	600,1	0,0	1882,3	5354,3	2,8%	-2241,6	10078,3
LAZIO	12789,2	136,6	1777,7	0,0	889,8	9985,1	4,56%	-7845,0	20634,2
LIGURIA	2486,4	132,2	116,6	0,0	235,7	2001,9	0,89%	-3341,7	5828,1
LOMBARDIA	50181,9	0,0	2441	0,0	11814,5	36106,4	17,88%	-15355,3	65517,2
MARCHE	2251,40	35,2	1351,3	0,0	364,7	500,2	0,80%	-4541,1	6792,5
MOULSE	3256,2	662,0	231,2	0,0	189,9	2173,1	1,16%	1894,9	1361,3
PIEMONTE	25478	26,0	1826,5	0,0	7558,0	20067,5	10,51%	6124,7	23353,3
PUGLIA	29542,6	4801,9	3839,2	0,0	8,9	20892,6	10,53%	13095,2	16447,4
SARDEGNA	13144,5	1677,1	1154,7	0,0	429,6	9883,1	4,69%	4710,0	8434,5
SICILIA	16122,6	2785,4	1911,3	0,0	401,3	11044,6	5,75%	-891,8	17014,4
TOSCANA	16685,2	250,2	946,4	6026,1	668,7	8743,8	5,93%	-1640,4	18275,6
TRENTINO-ALTO ADIGE	13637,4	0,0	475,3	0,0	11722,6	1439,5	4,86%	7034,7	6802,7
UMBRIA	3169,2	2,5	562,3	0,0	1185,3	1419,1	1,13%	-2047,0	5216,2
VALLE D'AOSTA	3659,9	3,7	27,8	0,0	3568,0	60,4	1,30%	2719,3	940,6
VENETO	14259,2	22,6	2178,8	0	4709,7	7348,1	5,08%	-16598,7	30857,9
TOTALE ITALIA	280531,1	18761,5	24941,4	6026,1	49495,3	181306,8	100,00%		

Tabella 4 - Produzione di energia elettrica regionale nell'anno 2021 - Fonte: TERNA



3. PIANO ENERGETICO CON PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRONUCLEARE





In questo paragrafo del Rapporto si evidenziano, in modo necessariamente sintetico e semplificato, gli aspetti fondamentali che devono essere presi in considerazione per progettare un piano energetico funzionale e realmente efficiente in un momento storico che ha evidenziato sempre più come l'energia sia un bene vitale e inalienabile. E non si può non tener conto, quando si appropria a questo tipo di progettazione, che è in atto una vera e propria trasformazione digitale in ogni settore, trasformazione che implicherà

una grande richiesta di energia in tutti i settori strategici e vitali e, dunque, azioni e strategie progettuali a basso impatto ambientale. Un concetto fondamentale che si deve tenere presente in questo tipo di progettazione è il seguente: una tecnologia energetica è realmente efficiente quando l'energia primaria, a fronte della trasformazione, garantisce una energia finale massima con perdite il più possibile contenute. Il bilancio costi-benefici per il suo utilizzo, inoltre, deve poter trovare sempre un giusto com-



promesso tra diversi fattori, un compromesso che prenda in considerazione la sicurezza, il basso impatto ambientale, l'efficienza, la possibilità di disporre costantemente di energia e l'indipendenza di approvvigionamento.

È, poi, certamente indispensabile considerare le caratteristiche geomorfologiche e climatiche di un territorio, oggetto di questa progettazione, il fabbisogno energetico, la quantità e la qualità delle risorse presenti e scegliere di conseguenza la tecnologia più adatta a quel territorio in re-

lazione al suo fattore di capacità, che esprime il rapporto tra l'energia che effettivamente la tecnologia ha prodotto in quelle determinate condizioni e quella che avrebbe prodotto se avesse lavorato sempre alla potenza nominale.

Compito del Progettista, inoltre, è anche quello di tenere in considerazione nello sviluppo del progetto le possibilità economiche a disposizione.

Panoramica delle risorse energetiche disponibili sul territorio

La disponibilità di materie prime da fonti fossili in Italia dalle quali ricavare energia è esigua e nel lungo termine insufficiente a garantire un costante approvvigionamento. Si stimano 350 miliardi di metri cubi di gas naturale disponibili nei giacimenti, per lo più dislocati nel mare Adriatico e la possibilità di arrivare in futuro ad utilizzare dai pozzi non eroganti e da quelli già operativi 10 miliardi di metri cubi l'anno, e si è, comunque, lontani dall'essere indipendenti dall'approvvigionamento estero considerando che l'attuale fabbisogno di gas è di circa 76 miliardi di metri cubi l'anno. Un'analogia situazione si riscontra per il petrolio e per il carbone in termini di autosufficienza.

Si stima una riserva di petrolio di circa 1,5-1,8 miliardi di barili di petrolio, maggiormente concentrata nella regione Basilicata e una sola miniera di carbone sub-bituminoso in Sardegna di 2,5 miliardi di tonnellate in grado di fornire 1 milione di tonnellate annue.

L'uranio, il combustibile più utilizzato per la produzione di energia nucleare dal processo di fissione nucleare nel resto del mondo, è presente in Italia prevalentemente nella miniera di Novazza, frazione di Valgoglio tra la provincia di Bergamo e quella di Sondrio. La miniera è attualmente chiusa, ma si stima che possano essere ricavate circa 1.300 tonnellate di ossido di uranio l'anno. Tra i maggiori produttori di uranio ci sono il Canada e l'Australia che insieme al Kazakistan contribuiscono a circa il 65% della produzione mondiale.

L'Italia, inoltre, come membro della Agenzia Internazionale per l'energia atomica (IAEA - *International Atomic Energy Agency*)¹⁶, possiede la proprietà di uranio al grado di arricchimento più adeguato alla produzione di energia elettronucleare da fissione nella banca mondiale IAEA localizzata in Kazakistan.

È opportuno evidenziare per quanto riguarda la densità energetica delle materie prime fossili ci-

tate un evidente superiorità dell'uranio in termini di resa energetica rispetto a gas naturale, petrolio e carbone (si veda la Tabella 5).

Per quanto riguarda le materie prime utilizzate nella tecnologia del solare fotovoltaico, ad esempio, silicio, argento, rame, alluminio, vetro, ci si deve confrontare con una fornitura europea di circa il 6% e con un monopolio nella disponibilità di materie prime e nella costruzione della componentistica detenuto dalla Cina, che nel 2020 ha prodotto circa il 70% dei pannelli solari a livello mondiale.

Anche per l'eolico è la Cina che domina il settore, sia per quanto riguarda l'estrazione di terre rare, la cui domanda è destinata a crescere nei prossimi decenni, sia per quanto riguarda la produzione di pale eoliche, motrici e dei componenti in generale.

La produzione di elettricità da idroelettrico rimane costante negli ultimi trent'anni dimostra certamente quanto questa tecnologia offra delle ottime prestazioni e sia durevole, ma anche che le principali risorse idriche sono state già utilizzate e che sia, dunque, limitata la possibilità di implementarlo.

Per quanto riguarda l'energia geotermica ad alta entalpia (>150°C) si individuano, in prevalenza, risorse in Toscana, Lazio e Sardegna.

La produzione di biogas da scarti biologici, reflui zootecnici, ecc., è, invece, chiaramente connessa alla disponibilità delle materie prime in termini di coltivazione e produzione sul territorio.

Fabbisogno energetico

Si è deciso, in questa parte dello studio, di utilizzare i dati relativi al fabbisogno energetico italiano del periodo antecedente alla pandemia, allo scopo di avere a disposizione una visione realistica della richiesta di energia in tutti i settori coinvolti.

L'energia elettrica totale richiesta in rete nel nostro Paese, in base ai dati del 2019, è pari a 318,6 TWh annui (con perdite in rete di circa 21,2 TWh). Nei grafici delle Figure 12 e 13, è rappresentata la distribuzione della produzione di energia elettrica in Italia nell'anno 2019 con i relativi consumi per settore.

L'88% dei 318,6 TWh richiesti in rete sono prodotti internamente e per il 53% circa da fonti fossili, il 12% circa di elettricità viene importata dall'estero e sono i 44TWh prodotti da energia nucleare.

È importante notare quanto energivori siano i settori dell'industria e del terziario, rispettivamente il 39% e il 37% dei consumi, ma anche quello residenziale che da solo supera il 20%.

È, altresì, importante sottolineare che tutti questi settori, hanno bisogno costante di energia elettrica che deve essere garantita dalla grande rete di distribuzione nell'arco delle 24 ore

FONTI	DENSITÀ DI ENERGIA (MJ/kg)
Uranio	24.000.000
Gas	53,6
Carbone	32,5
Petrolio	41,87

Tabella 5 - Densità energetiche uranio, gas, carbone, petrolio - Fonte: Impianti Nucleari, Maurizio Cumo

e che tale esigenza è destinata ad aumentare anche in considerazione della forte spinta a livello mondiale verso una società sempre più elettrificata.

Il fabbisogno di energia elettrica si traduce in una potenza elettrica istantanea richiesta in rete di circa 50.000 MWe che devono essere garan-

titi nelle ore diurne (di massimo carico) e che diventano circa 15.000 nelle ore notturne, e si deve, evidentemente, considerare che questa richiesta è destinata ad aumentare con la crescita demografica e soprattutto con la forte spinta alla digitalizzazione prevista nei prossimi anni e al trasporto elettrico che, come si eviden-

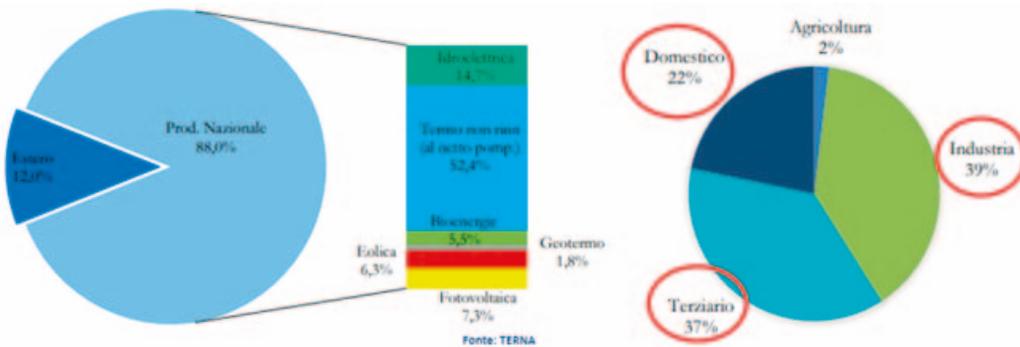


Figura 12 - Distribuzione della produzione di energia elettrica in Italia nell'anno 2019 - Fonte: Terna

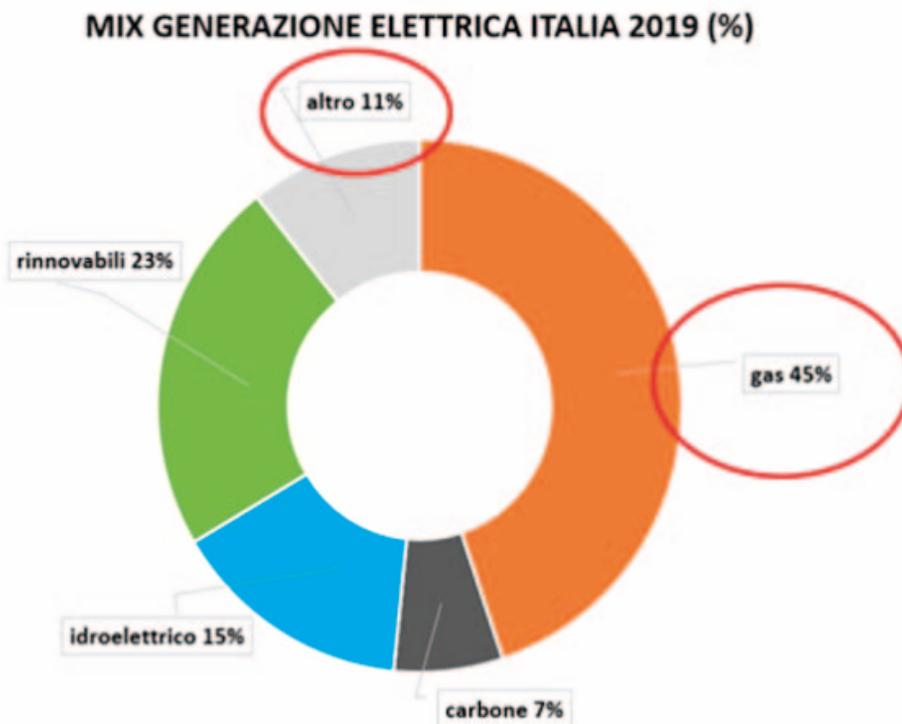


Figura 13 - Distribuzione in percentuale della produzione di energia elettrica in Italia nell'anno 2019 (Fonte: <https://blog.yem-energy.com/it/energia-rinnovabile-mix-energetico-e-spinta-green-europea>)

	2017	2018	2019*
Consistenza parco veicolare alimentato ad energia elettrica (**)	20.070	30.426	49.949
- di cui autovetture BEV (elettriche pure)	7.560	12.156	22.728
- di cui autovetture PHEV (ibride plug-in)	5.268	9.871	16.313
- di cui altri veicoli (motocicli, autocarri, filobus, autobus)	7.242	8.399	10.908
Energia elettrica complessiva consumata su strada - GWh	82,9	99,0	136,6
Energia elettrica rinnovabile consumata su strada - GWh (***)	27,8	33,7	46,6

(*) Stime preliminari

(**) Elaborazioni GSE su dati ACI, ANFIA, Aziende di Trasporto Pubblico Locale.

(***) In ciascun anno t, il dato è calcolato applicando ai consumi complessivi la quota FER nel settore elettrico dell'anno t-2.

Fonte: GSE

Tabella 6 - Consumi di elettricità legati al trasporto elettrico italiano - Fonte: GSE

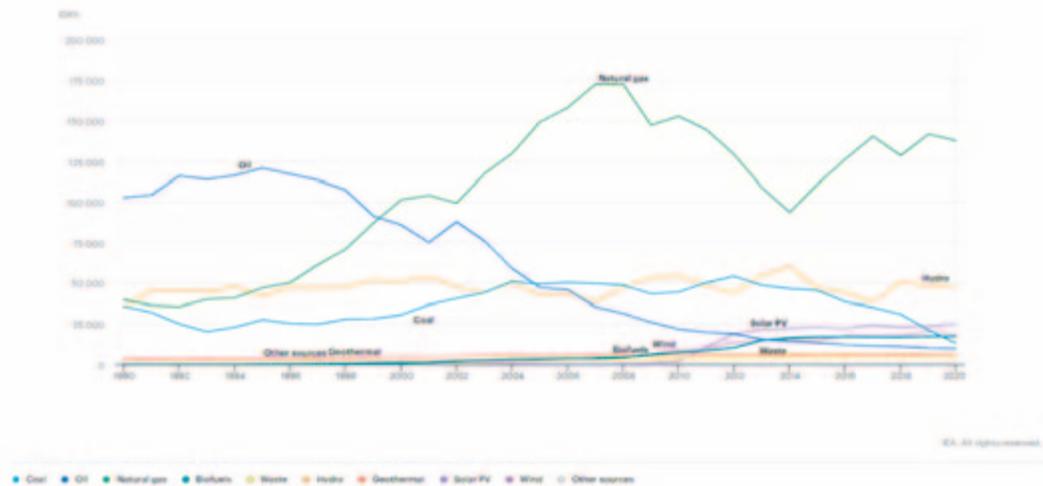


Figura 14 - Andamento della produzione di elettricità per fonte in Italia negli ultimi 30 anni - Fonte: IEA

zia nella Tabella 6, è più che raddoppiato nel triennio 2017-2019.

Nel grafico in Figura 14 è interessante osservare l'andamento della produzione di elettricità per fonte in Italia negli ultimi 30 anni. Si evidenzia che l'utilizzo del gas naturale, la curva in verde, è aumentato notevolmente, a differenza del petrolio che ha subito un calo netto. Si può notare, poi, un sensibile aumento delle rinnovabili e un apporto pressoché costante di elettricità prodotta da idroelettrico.

I numeri della dipendenza energetica del nostro Paese si possono riassumere nei grafici della Figura 15, poiché circa il 53% della produzione di energia elettrica interna, come indicato nei precedenti grafici, viene prevalentemente dal

gas naturale acquistato dall'estero in una percentuale del 96% circa e si deve aggiungere quel 12% circa di energia elettrica nucleare che comunque viene importata, fondamentale a garantire la stabilità della rete elettrica nazionale¹⁷. Si può notare, dunque, che il nostro mix energetico è basato quasi esclusivamente su fonti fossili, e si arriva fino all'80% di fonti fossili impiegate per produrre energia elettrica e termica.

Potenzialità del territorio in termini di utilizzo delle risorse energetiche fossili e rinnovabili

Il territorio italiano si estende su una superficie di 301.340 km² (35,2% montagna, 41,6% collina, 23,2% pianura con il 2,4% di acqua interna)

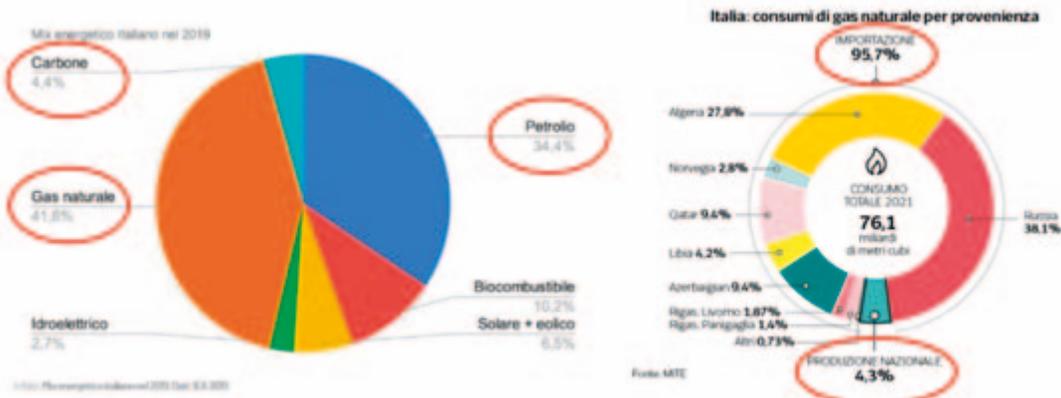


Figura 15 - Mix energetico italiano (anno 2019) - Fonte: IEA

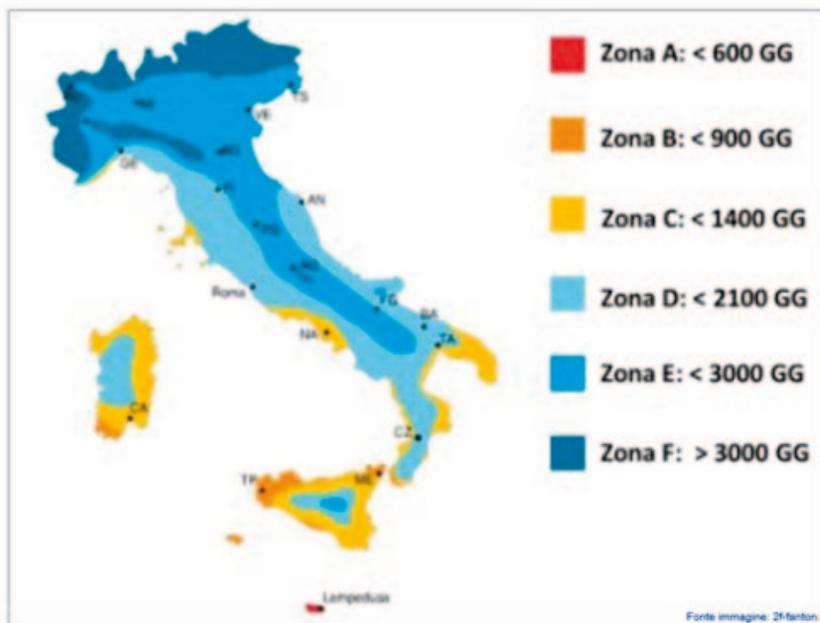


Figura 16 - Mappa delle zone climatiche e dei gradi giorni in territorio italiano

e solo per un quarto è pianeggiante. Il suolo è fortemente antropizzato, circa 60.497.174 di abitanti, ed è caratterizzato, in via esemplificativa, da un clima temperato, temperato freddo e freddo con poche zone, come mostra la mappa della Figura 16, aventi un valore di gradi giorno basso ossia con un periodo di riscaldamento breve e temperature medie giornaliere prossime alla temperatura fissata per l'ambiente (20°C). Osservando, invece, la mappa della ventosità in Figura 17, si nota che, prevalentemente al sud e soprattutto off-shore, la velocità del vento supera quella minima di cui necessita un generatore eolico per avviarsi. Un generatore eolico, infatti,

sia ad asse verticale che orizzontale, necessita di una velocità minima del vento (cut-in) di 3-5 m/s ed eroga la potenza di progetto ad una velocità del vento di 12-14 m/s.

È, evidentemente, importante mettere in relazione anche la disponibilità di territorio in termini di superficie con la scelta delle tecnologie in grado di produrre energia.

Di seguito vengono messe a confronto le potenze elettriche da rinnovabili e da nucleare in termini di "erosione" del territorio; a parità di potenza di 1000 MW_e, come ordine di grandezza, una centrale nucleare occupa qualche decina di ettari di terreno, un campo fotovoltaico e un

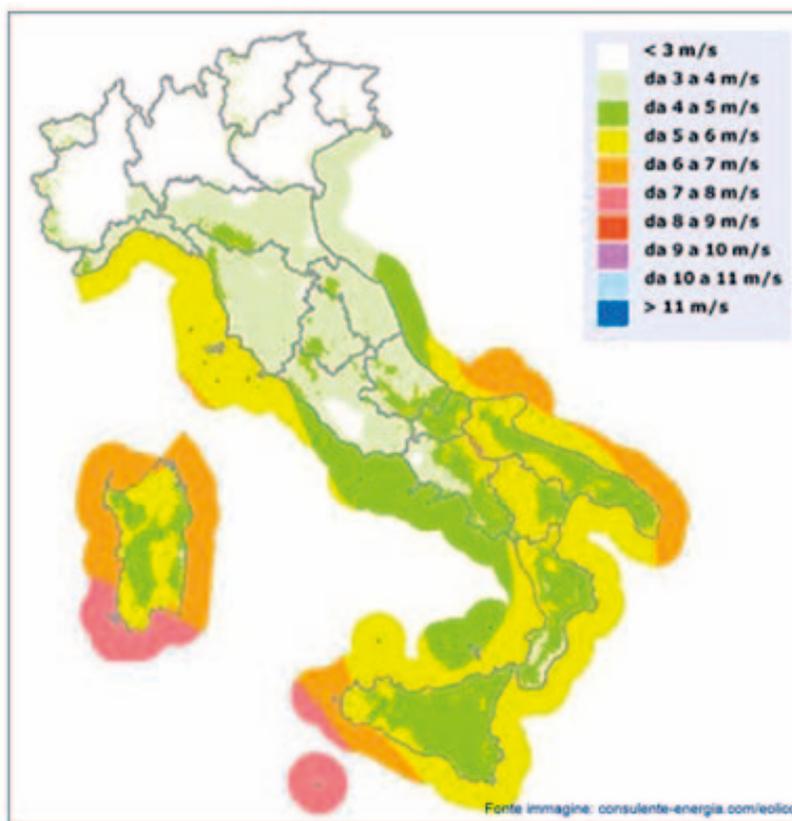


Figura 17 - Mappa della velocità dei venti in territorio italiano

campo eolico, come ordine di grandezza, migliaia di ettari¹⁸ con un'incidenza di occupazione maggiore per quest'ultimo.

Un impianto di cogenerazione a biomassa, per produrre la stessa energia, deve utilizzare un determinato tipo di raccolto proveniente dalla coltivazione, stimabile, come ordine di grandezza, in migliaia di ettari di terreno.

Sul nostro territorio, inoltre, i fattori di capacità del fotovoltaico e dell'eolico sono rispettivamente il 13% circa per il fotovoltaico e il 22% circa per l'eolico (Fonte: <https://ilbolive.unipd.it/news/numeri-rinnovabili-italia-obiettivi-energetici>).

Il fattore di capacità di un impianto nucleare, che non è legato alle condizioni climatiche e geomorfologiche del territorio, è di circa il 90% (Fonte: <https://www.energy.gov/ne/articles/whats-lifespan-nuclear-reactor-much-longer-you-might-think>).

In Italia, ad oggi, si stima siano state installate tecnologie rinnovabili (escluso l'idroelettrico) per una potenza efficiente lorda di circa 38.8 GWe che equivalgono ad una produzione teorica annuale di circa 339888 GWh (38,8x365x24).

Dalla Tabella 7, fornita da Terna, relativa alla richiesta di energia elettrica nell'anno 2022, si evince che i suddetti 38.8 GWe delle FER (escluso l'idroelettrico), corrispondono, tenendo conto dei parametri di funzionamento caratteristici delle fonti energetiche in questione ad una produzione netta di energia di circa 70474 GWh che corrispondono circa al 20% della suddetta produzione teorica annuale.

Il criterio della diversificazione tecnologica e geografica

La scelta di una tecnologia ecosostenibile, sia dal punto di vista di inquinanti immessi direttamente in atmosfera che da CO₂ prodotta, e che garantisca efficienza energetica e risparmio, deve essere fatta, a seguito di un'attenta analisi di impatto ambientale, in base al criterio della diversificazione tecnologica e geografica: ciò che dal punto di vista ingegneristico può essere adatto per una determinata area geografica, può non esserlo per un'altra.

Questo criterio basilare implica che il Progetti-

Bilancio Energia

[GWh]	Dicembre 2022	Dicembre 2021	%22/21	Gen-Dic 22	Gen-Dic 21	%22/21
Iidrico Rinnovabile	2.299	2.824	-18,6%	27.959	44.878	-37,7%
Pompaggio in produzione ⁽²⁾	122	228	-46,6%	1.773	2.041	-13,1%
Termica	17.066	18.167	-6,1%	193.287	182.234	6,1%
di cui Biomasse	1.412	1.474	-4,2%	17.120	17.496	-2,1%
di cui Carbone	2.161	1.509	43,2%	20.768	12.868	61,4%
Geotermica	460	469	-1,9%	5.444	5.535	-1,6%
Eolica	1.720	2.836	-39,4%	20.358	20.724	-1,8%
Fotovoltaica	818	988	-17,2%	27.552	24.633	11,8%
Totale produzione netta	22.485	25.512	-11,9%	276.373	280.045	-1,3%
Energia destinata ai pompaggi	174	326	-46,6%	2.533	2.916	-13,1%
Totale produzione netta al consumo	22.311	25.186	-11,4%	273.840	277.129	-1,2%
di cui FER ⁽³⁾	6.709	8.591	-21,9%	98.433	113.266	-13,1%
di cui non FER	15.602	16.595	-6,0%	175.407	163.863	7,0%
Importazione	3.323	2.877	15,5%	47.391	46.572	1,8%
Esportazione	661	603	9,8%	4.404	3.782	16,4%
Saldo estero	2.662	2.274	17,1%	42.987	42.790	0,5%
Richiesta di Energia elettrica (1)	24.973	27.460	-9,1%	316.827	319.919	-1,0%

(1) Richiesta di Energia Elettrica = Totale produzione netta al consumo + Saldo estero, dove Totale produzione netta al consumo = Totale produzione netta - energia destinata ai pompaggi

(2) Quota di produzione per apporto da Pompaggio, calcolata con il rendimento medio teorico dal pompaggio in assorbimento

(3) Produzione da FER = Iidrico Rinnovabile + Biomasse + Geotermico + Eolico + Fotovoltaico

Fonte: Terna

Tabella 7 - Bilancio energia; richiesta di energia elettrica nell'anno 2022 - Fonte: TERNA

sta debba prendere in considerazione una serie di fattori essenziali ed analizzarli attentamente prima di procedere all'elaborazione di un piano energetico efficace.

Tra questi, come si è accennato in precedenza, fondamentali sono la geomorfologia del territorio anche in termini di disponibilità del territorio e di quantità e qualità delle risorse, le condizioni climatiche, i fattori di capacità di tutte le tecnologie in particolare da fonte solare ed eolica in quanto per queste fonti tali fattori sono caratteristici del territorio oggetto dell'analisi progettuale e, naturalmente, il fabbisogno energetico che deve essere calcolato sul territorio regione per regione. Nondimeno importanti da valutare dal punto di vista progettuale, sono il contesto urbano, le infrastrutture presenti, le potenzialità della grande rete di distribuzione dell'energia e la capacità nel breve, medio e lungo termine di investire sulle nuove infrastrutture.

Dalla corretta interpretazione di questi fattori, esposti in via esemplificativa, e dalla corretta scelta della tecnologia da destinare ad un deter-

minato territorio, è possibile garantire un progetto che coniughi realisticamente sicurezza e basso rischio per l'ambiente, efficienza e disponibilità costante di energia, semplicità di gestione della tecnologia nel suo complesso, durezza dell'infrastruttura, investimenti accettabili dal punto di vista economico, indipendenza di approvvigionamento e crescita e sviluppo tecnologico. È bene evidenziare, inoltre, che l'indipendenza energetica di un Paese non deve eludere quella derivante dagli altri utilizzi del territorio, fondamentali in termini di sicurezza, sviluppo e crescita; a tal riguardo, ad esempio, l'utilizzo delle zone da destinare a verde (agricoltura, allevamento, ecc.) e allo sviluppo demografico.

Stima delle tecnologie fossili e rinnovabili da implementare e da collocare sul territorio

Nel nostro Paese, da una valutazione di impatto ambientale (VIA) e da una valutazione ambientale strategica (VAS) preliminari, basate su osservazioni tecnico-ingegneristiche essenziali, da una stima del dimensionamento delle mate-

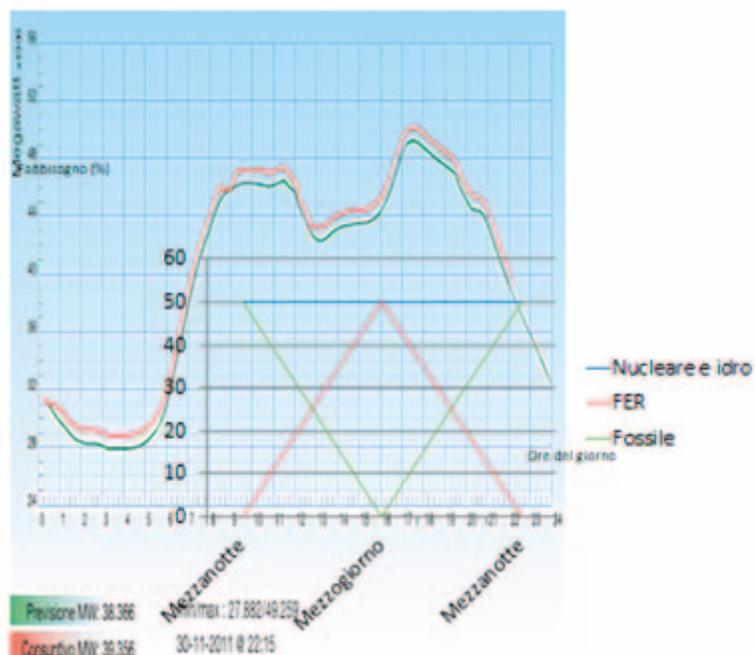


Figura 18 - Mix ottimale ingegneristico della produzione elettrica in Italia - Fonte: Ing. Massimo Sepielli - Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

rie prime utilizzabili, dalla stima del fabbisogno energetico in termini di TWh in relazione alle esigenze presenti e future, emerge l'opportunità di reintrodurre la tecnologia nucleare per la produzione di energia elettrica accanto alle tecnologie da fonti rinnovabili e ai combustibili fossili, in prevalenza gas naturale italiano e proveniente da Paesi politicamente stabili.

Un mix energetico ottimale, frutto di una progettazione razionale, deve basarsi sull'utilizzo bilanciato e dimensionato delle fonti energetiche primarie per la produzione di energia elettrica e termica e deve prevalentemente prendere in considerazione tutte le fonti per il cui utilizzo esistono tecnologie ben collaudate, già presenti sul mercato, e che abbiano una capacità di impatto positivo rispetto alla domanda.

In questo mix teorico integrato ogni fonte deve essere sfruttata al massimo delle sue caratteristiche assicurando che i benefici per il loro utilizzo siano nettamente superiori agli svantaggi, in particolare a livello di sicurezza ed impatto ambientale.

Nel nostro Paese, in base alle precedenti osservazioni di carattere tecnico, alle risorse ambientali del territorio e al picco di potenza massima giornaliera richiesta, stimato intorno ai 50 GWe, è possibile ipotizzare un mix energetico teorico che preveda l'utilizzo di energia elettronucleare da fissione insieme a quella prodotta da idroelettrico, come carico di base, nella misura di

circa il 50%, pari a 25 GWe, e per il restante 50% da energia prodotta da fonte rinnovabile (solare-fotovoltaico, geotermia, eolico, biomassa, biogas) e da fonti fossili (gas naturale, petrolio e carbone), prevalentemente estratti sul territorio nazionale.

Nel grafico in Figura 18 viene schematizzato il suddetto mix con la curva a M che rappresenta proprio la richiesta di carico giornaliero: la parte costante (linea celeste orizzontale), ipotizzata al 50% rappresenta proprio il contributo delle fonti primarie quali l'energia elettronucleare e idroelettrica, prontamente disponibili, de-carbonizzate e a basso impatto ambientale in termini di inquinanti direttamente immessi in atmosfera; la parte variabile (linea viola con punto di massima alle ore 12.00 a.m. e la linea verde con punto di minimo alle ore 12.00 a.m.) rappresenta l'energia prodotta dalle altre fonti rinnovabili.

La intermittenza delle fonti FER che non permettono una programmabilità della potenza sulla rete, in questa prospettiva, sarebbe ben compensata e bilanciata. L'utilizzo del gas naturale in questa prospettiva si presta a bilanciare la carenza di produzione delle FER intermittenti, in particolare da fotovoltaico, per quanto riguarda la parte di carico variabile richiesta dalla rete.

La quota di energia elettronucleare, inoltre, coprirebbe in questa proiezione circa un terzo della potenza elettrica istantanea che deve essere garantita in rete e stimata, come si è evi-

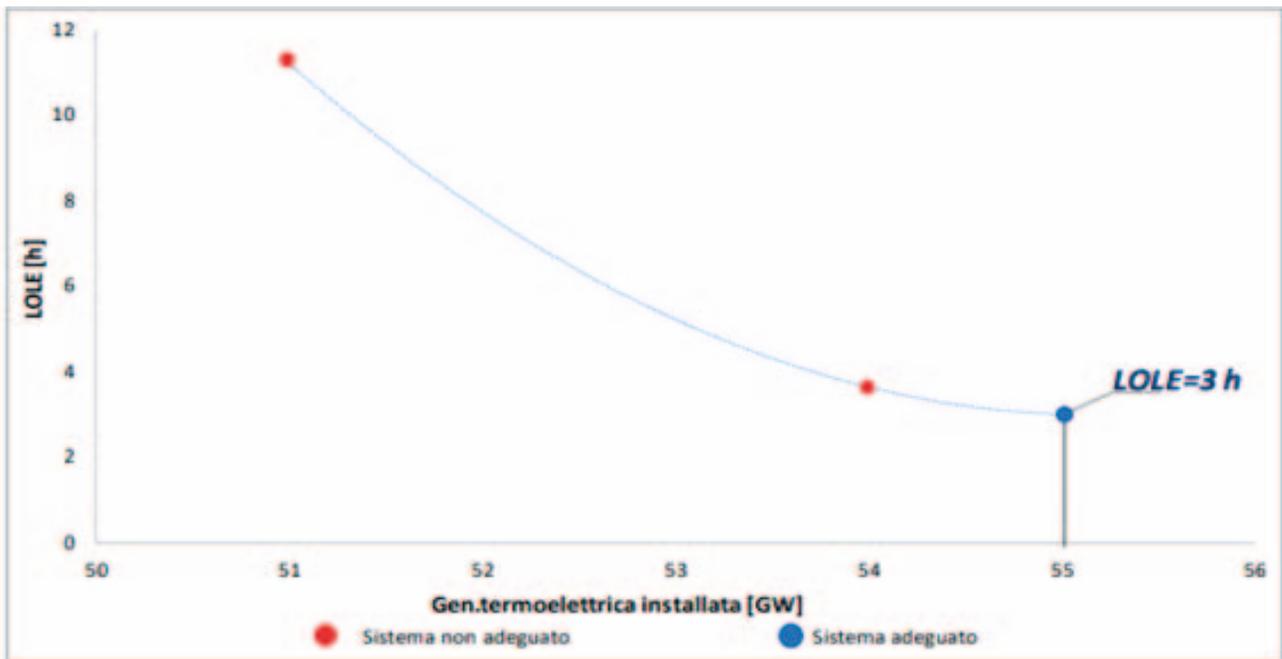


Figura 19 - RAPPORTO ADEGUATEZZA ITALIA 2019 - Fonte: TERNA

denziato, a circa 50.000 MWe. Una tale scelta progettuale assicurerebbe, dunque, l'approvvigionamento dell'energia nelle ore notturne che è pari a circa 15.000 MWe.

Un piano energetico così bilanciato permetterebbe al nostro Paese di avere una produzione energetica a bassa presenza di inquinanti e decarbonizzata, di ridurre i costi e i rischi della fornitura estera e, soprattutto, di utilizzare pienamente le risorse nazionali, favorendo il rilancio dell'industria, dell'occupazione e un crescente sviluppo economico.

Quando si progetta un piano energetico integrato, come quello ipotizzato, bisogna, poi, tenere in considerazione sempre la potenzialità della rete elettrica nazionale, la quale deve garantire istante per istante che l'energia richiesta dai consumatori (famiglie, aziende, industrie, ecc.) sia sempre in equilibrio con l'energia prodotta.

Un sistema complesso integrato di reti e sottoreti, alimentato da più fonti energetiche, dovrà modulare, a tale scopo, la variazione di potenza da fonti rinnovabili non programmabili, (fotovoltaico ed eolico), e dovrà far fronte sia alla complessa gestione delle relative reti e sottoreti e dei sistemi di accumulo necessari, sia alla gestione della produzione di energia elettrica intermittente immessa nella rete di distribuzione.

A tal riguardo si rende necessario approfondire anche il problema della stabilità della rete elettrica nazionale.

Il crescente sviluppo ed allacciamento alla rete elettrica nazionale di impianti di generazione FER interfacciati tramite elettronica di potenza richiede sempre più, da parte dei gestori di rete, di valutarne l'impatto e le possibili soluzioni in termini di stabilità della frequenza di rete dovuta ad una progressiva riduzione dell'inerzia rotante (motori e turboalternatori) al diminuire di impianti di generazione termica.

Il maggior impegno tecnico ed economico che dovranno esercitare, nel prossimo futuro, i gestori delle reti di trasmissione, pertanto, sarà quello di gestire in sicurezza il sistema elettrico con una crescente presenza di FER ed elettronica di potenza.

Si dovranno adottare soluzioni specifiche in grado di garantire la stabilità della frequenza di rete a fronte di eventi perturbativi poiché la rete elettrica così com'è stata concepita non può offrire lo stesso livello di stabilità se il contributo delle FER aumenta oltre un certo livello (fattore di carico). Questa evidenza prescinde dalla funzionalità e dalla qualità della rete elettrica nazionale, che è una infrastruttura solida, resiliente e ad alta intensità di potenza.

Nel Rapporto di adeguatezza 2019 (Figura 19), TERNA ha riportato una simulazione dell'indicatore di adeguatezza denominato "aspettativa di perdita di carico" - *Loss of Load Expectation* (LOLE), che rappresenta la media matematica (attesa) del numero di ore in cui si verifica un di-



stacco di carico simulato con appositi codici di calcolo (ad esempio, il metodo Monte Carlo¹⁹). In Italia, con il Decreto Ministeriale del 28 giugno 2019 del Ministero dello Sviluppo Economico, è stato sancito un valore obiettivo del LOLE di tre ore per anno.

La valutazione della capacità di generazione termoelettrica adeguata viene riportato attraverso il valore del LOLE in funzione della generazione termoelettrica installata.

In questo scenario la capacità di generazione termoelettrica necessaria per garantire un sistema adeguato risulta pari a circa 55 GWe.

Si riportano, per un utile confronto con quanto si è appena evidenziato, le aspettative descritte nello Scenario del Piano Nazionale Integrato Energia Clima - PNIEC 2030:

- generazione rinnovabile non programmabile fino a circa 69 GWe complessivi;
- 6 GWe complessivi di capacità di accumulo;
- una domanda complessiva pari a 330 TWh;
- uscita totale dal carbone.

È opportuno, dunque, evidenziare, che il mix energetico teorico proposto potrebbe massimizzare, in tempi relativamente brevi, le prestazioni di ogni singola tecnologia e contribuire progressivamente all'esigenza di ridurre l'impatto derivante dai processi di combustione delle fonti fossili.

Parametri progettuali di sicurezza

L'esposizione alla sismicità e al dissesto idrogeologico del nostro Paese impone una particolare attenzione ai parametri con i quali si progetta una qualsiasi infrastruttura, incluse quelle preposte alla fruizione delle varie risorse energetiche, sia che utilizzino fonti fossili, sia che utilizzino fonti rinnovabili.

Il suo aspetto geomorfologico, inoltre, impone un'analisi discretizzata e capillare del territorio atta a identificare la giusta tecnologia per produrre energia da destinare ad una determinata zona geografica. Un'errata interpretazione, in tal senso, può di fatto esporre al rischio l'ambiente



e vanificare in termini economici l'investimento. Le norme tecniche di costruzione (NTC), in tal senso, si basano su criteri progettuali agli stadi limite ultimi e adottano per ogni costruzione una accelerazione di riferimento «propria» sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto (su una maglia di 5 km di lato) e in funzione della vita nominale dell'opera.

I criteri con cui qualche decennio fa furono edificate le centrali nucleari in Italia, ad esempio, già si basavano su parametri progettuali di sicurezza elevati (in linea con il Progetto Unificato Nucleare - PUN) e la loro collocazione geografica, infatti, rientra nelle zone di garanzia rispetto alla esposizione alla sismicità e al dissesto idrogeologico.

Stima della componente elettronucleare da fissione da collocare sul territorio

A fronte dello status quo energetico italiano, con l'obiettivo di proporre un piano energetico a basso impatto ambientale e in considerazione dell'esigenza di garantire l'approvvigionamento energetico durante tutto l'arco della giornata

sarebbe, dunque, opportuno, nell'ambito di un piano energetico integrato che veda la graduale reintroduzione del nucleare, installare, in un arco temporale di circa 7-10 anni, un numero di reattori nucleari, di pronto impiego, tali da coprire almeno i circa 15.000 MWe di fabbisogno notturno.

La scelta della taglia in termini di potenza dei reattori nucleari deve essere subordinata, in via esemplificativa, alle esigenze di ogni singola regione ovvero alle loro caratteristiche geomorfologiche e ambientali, al loro fabbisogno energetico e alla potenzialità delle infrastrutture presenti per il trasporto e la distribuzione di energia elettrica.

Si richiamano, in questa sede, alcuni aspetti rilevanti di un impianto nucleare per la produzione di energia elettrica, aspetti che hanno un ruolo importante in un piano energetico efficiente e a basso impatto ambientale. Tra questi: gli elevati standard di sicurezza della tecnologia, legati ad una attenta valutazione ambientale e ai principi della radioprotezione, le immissioni dirette di inquinanti e di CO₂ in atmosfera pressoché nulle,

un fattore di capacità di circa il 90% con il minor impiego di combustibile, una vita media della tecnologia di circa 60/80 anni e un processo tecnologico pianificato sin dalla progettazione, quindi dal ciclo combustibile, alla fase di esercizio e manutenzione, al deposito per i rifiuti radioattivi, un costo del kWh competitivo che scaturisce proprio da queste caratteristiche tecniche e la sinergia con la rete elettrica nazionale. Un altro aspetto da tenere in considerazione è l'esperienza accumulata, soprattutto a partire dagli anni '90, nello smantellamento degli impianti nucleari di potenza, che consente di recuperare, riciclando o destinando ad altri usi, oltre il 90% dei materiali di cui è costituita la centrale²⁰, con punte che arrivano al 95% per i metalli (se si considera la possibilità di decontaminarli).

Criteri progettuali e di sicurezza della componente elettronucleare da fissione

Alla base di tutti i progetti nucleari, da quelli di prima generazione fino ad arrivare a quelli di più recente realizzazione, esiste una specifica progettazione della sicurezza, caratteristica della tecnologia nucleare.

Gli obiettivi principali del progetto nucleare ovvero di un reattore nucleare, finalizzati al mantenimento dei più alti livelli di sicurezza, consistono in via esemplificativa nel controllo

e nel mantenimento della reazione di fissione, nel calcolo e controllo della potenza termica e della reattività del reattore. E consistono, inoltre, nella scelta e nel dimensionamento dei materiali preposti allo scambio termico e a garanzia della tenuta strutturale stessa.

Il nocciolo del reattore, ovvero la sede ove avviene la reazione di fissione, viene dimensionato in base alla potenza di progetto, e la scelta di tutti gli altri elementi e dei materiali dovrà essere subordinata a questa, in un rapporto di stretto equilibrio.

È per tale ragione, che per i calcoli del progetto nucleare, si adotta la tecnica della separabilità e della sovrapposizione degli effetti e si implementa, poi, il risultato con elevati fattori di sicurezza.

Lo scopo della sicurezza nucleare è quello di preservare da eventi, anche estremi, sia l'interno che l'esterno dell'impianto nucleare, attraverso un principio base della sicurezza nucleare che è quello della difesa in profondità. È con questo principio che sono state stabilite normative riconosciute e applicate a livello internazionale. Ogni impianto nucleare ha, quindi, almeno quattro barriere fisiche, barriere che sono in successione ed interposte fra il nocciolo e l'ambiente esterno. Partendo dall'esterno si trovano: l'edificio di contenimento, il circuito di raffreddamento del nocciolo, il vessel, le guaine delle barrette di combustibile dove è alloggiato il combustibile, e il



materiale solido che costituisce il combustibile. In aggiunta a queste barriere fisiche di protezione, sono presenti altri sistemi di sicurezza che possono essere di tipo attivo o passivo, finalizzati ad evitare incidenti o a contenere eventuali danni in caso di incidente. I sistemi attivi, che sono presenti in ridondanza, sono quei sistemi alimentati elettricamente, che richiedono il funzionamento di specifici dispositivi. Quelli passivi, invece, si innescano spontaneamente, in presenza di determinate condizioni, perché azionati da fenomeni fisici ineludibili, ad esempio la gravità, la convezione naturale e riescono a fermare, sul nascere, potenziali incidenti, anche senza sistemi attivi.

Cronologia degli interventi del nuovo mix energetico da perseguire nel breve e medio termine

La spinta verso una elettrificazione più avanzata che attenda agli obiettivi della sostenibilità ambientale e della indipendenza di approvvigionamento deve necessariamente puntare sulla graduale sostituzione delle fonti fossili a più alto impatto ambientale e sfruttare la maggiore efficienza dei generatori di elettricità rispetto ai bisogni elettrici e termici con l'effetto di un risparmio energetico ingente.

In tal senso, partendo da un dimensionamento

energetico calcolato rispetto ad un fabbisogno dinamico si deve attuare un piano di sviluppo a tappe nel breve, medio e lungo termine, che veda, però, nell'immediato l'aggiornamento e la semplificazione della normativa e di tutti i processi autorizzativi e progressivamente l'introduzione anche di reattori nucleari di pronto impiego, un aumento di rinnovabili su larga scala con quelle intermettenti da destinare prevalentemente all'autoconsumo e l'utilizzo del gas nazionale per la riserva calda e per affiancare le rinnovabili non programmabili.

È fondamentale, tuttavia, che accanto agli interventi emergenziali, si pianifichino già quelli nel medio termine per evitare, che ciò che in emergenza si andrà a fare, pregiudichi quelle che devono essere le soluzioni realisticamente risolutive dei nostri problemi energetici.

Certamente, adesso, e per i prossimi anni, almeno fino al 2025, è opportuno compiere le seguenti strategie emergenziali: diversificare l'approvvigionamento di gas naturale estero e aumentare l'import elettrico con contratti a prezzi concordati e per un periodo prestabilito; aumentare la produzione di gas nazionale e intraprendere opere di manutenzione dei vecchi impianti; avviare la progettazione eventuale di nuove centrali turbogas e di rigassificatori per il gas liquido, aumentare la quota delle rinnovabili non programma-



bili soprattutto per autoconsumo, da destinare all'edilizia urbana ed extra urbana, alle piccole e medie imprese e avviare la progettazione degli impianti rinnovabili su larga scala.

È importante, inoltre, attuare piani di manutenzione e di potenziamento della rete elettrica nazionale per ridurre le perdite e progettare piani di riciclo dei rifiuti e termovalorizzatori di nuova generazione per la relativa produzione di energia.

Ma è anche questa la fase dove bisognerebbe cominciare ad avviare l'iter tecnico e amministrativo per la collocazione sul territorio dei reattori nucleari di pronto impiego e lanciare un piano nazionale di ricerca e sviluppo (R&S).

Nel medio termine, in un arco temporale dal 2025 al 2030, si potrebbe, dunque, già cominciare a costruire le nuove infrastrutture per la produzione di energia, aprendo a investimenti e collaborazioni estere anche durante la fase progettuale. Si riuscirebbe, allora, entro il 2030, già ad avere nel nostro Paese le nuove centrali turbogas e i nuovi impianti a energia rinnovabile di grande potenza e si potrebbero già installare i nuovi reattori commerciali di grande e piccola taglia fino ad un 20% circa della produzione elettrica di base.

Per arrivare nel lungo periodo, quindi dal 2030 al 2050, a consolidare l'indipendenza energetica potenziando ulteriormente la quota delle rinnovabili, bilanciata da accumuli performanti e installando reattori, compresi quelli ad alto rendimento termodinamico, fino ad un 40%-50% circa della produzione elettrica che permetterebbero di produrre in quantità anche idrogeno ecosostenibile.





4. TECNOLOGIE NUCLEARI DI PRONTO IMPIEGO







Figura 20 - Veduta del sito nucleare di Belojarsk, nei pressi di Ekaterinburg (Federazione Russa), dove sono installati gli unici 2 reattori a neutroni veloci, refrigerati a sodio, attualmente in esercizio commerciale, il BN 600 (Belojarsk-3, 1981) e BN 800 (Belojarsk-4, 2015), che convenzionalmente appartengono alla cosiddetta Gen. IV.

Principali operatori nel mercato dei reattori con caratteristiche di III Gen/III Gen+	
Fornitore	Modelli in commercio
EDF (Framatome) 	EPR2, Atmea1, Kerena
Westinghouse  GE Hitachi 	AP1000 ABWR, ESBWR, PRISM
KHNP 	APR1400, EU-APR
Mitsubishi 	APWR, Atmea1
Rosatom  SNC-Lavalin  CNNC & CGN 	AES-92, AES-2006, VVER-TOI EC6 Hualong One
SNPTC 	CAP1400

Tabella 8 - Principali reattori allo stato dell'arte, che comprendono, gli LWR e i reattori ad acqua pesante canadesi EC6 (PHWR); ai progetti in tabella vanno, inoltre, aggiunti gli HTGR cinesi (modello HTR-PM 200) e il reattore veloce russo BN-800 refrigerato a sodio.

In linea con l'esigenza di attendere nel breve e medio periodo alla emergenza energetica del nostro Paese si fornisce, nel seguito, una panoramica dei reattori di ultima generazione a livello mondiale, privilegiando quelli già in esercizio o comunque pronti per essere installati.

Stato dell'arte dei reattori di potenza e preselezione dei progetti per lo scenario italiano

È stata condotta una indagine di mercato sui reattori di potenza che ad oggi rappresentano

lo stato dell'arte delle tecnologie elettronucleari. Al 2022 risultavano sul mercato almeno 20 progetti, raggruppabili principalmente nella tipologia di reattori ad acqua leggera (Light Water Reactor - LWR), di cui 12 ad acqua pressurizzata (Pressurized Water Reactor - PWR) e 3 ad acqua bollente (Boiling Water Reactor - BWR); a questi si aggiungono i modelli ad acqua pesante proposti dall'industria canadese, i reattori ad alta temperatura refrigerati a gas (High Temperature Gas Reactor - HTGR), già in operazione in Cina e pensati anche per l'esportazione ed

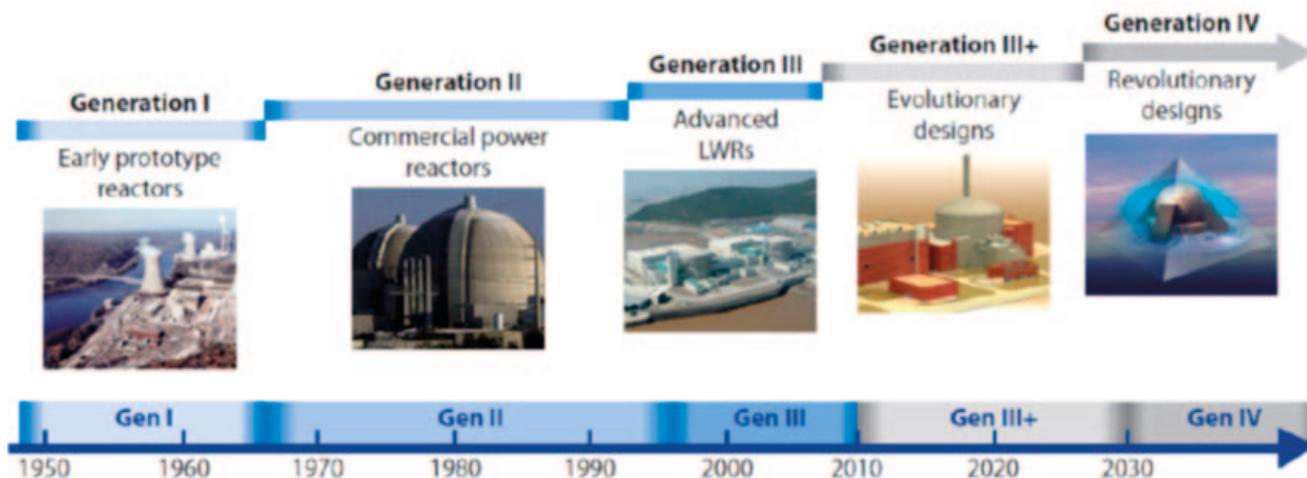


Figura 21 - Fonte: <https://www.gen-4.org/gif/upload/docs/application/pdf/2014-03/gif-tru2014.pdf>

infine, per completezza, si annovera anche l'unico modello di reattore veloce di potenza, refrigerato a sodio, attualmente in operazione nella Federazione Russa.

La Tabella 8 mostra i principali operatori del mercato e i progetti proposti.

Sussistono, praticamente tra tutti gli operatori, complesse alleanze che vanno dallo sviluppo di versioni ad hoc dei progetti proposti, al rafforzamento della filiera di fabbricazione e fornitura dei componenti (anche in relazione all'area geografica di installazione), passando per il finanziamento del capitale.

Da notare l'assenza di progetti direttamente riconducibili al Regno Unito o alla Germania, Paesi che in passato hanno progettato, realizzato, esportato e operato sul proprio territorio i loro reattori di potenza²¹.

Se da un lato la Germania sembra aver abbandonato l'uso dell'energia nucleare per mera scelta politica, nel Regno Unito, l'energia nucleare è, tuttora, oggetto di rilancio (si veda nel seguito); i Governi Britannici degli ultimi 20 anni, tuttavia, in accordo con le utility elettriche, hanno scelto di non affidarsi più ad un reattore nazionale ma di acquistare gli impianti nucleari chiavi in mano da fornitori terzi (anche questo aspetto sarà approfondito successivamente).

In questa indagine non sono stati considerati i modelli ancora in fase di sviluppo, anche se avanzata, o prossimi alla commercializzazione; tra questi si annoverano diversi progetti di *Small Modular Reactor* (SMR) ad acqua leggera tra cui, ad esempio, il CAREM²² argentino, attualmente in costruzione, oppure il VOYGRM SMR basato sul Power Module TM della NuScale²³, alcuni modelli HTGR (ad esempio lo HTRR Giapponese o il PBMR del Sudafrica), ed alcune tipologie di reattori veloci, refrigerati a metallo liquido, ma di taglia assimilabile agli SMR (l'italiano ALFRED, ecc.).

Sono stati considerati, invece, soltanto progetti di impianti nucleari di potenza che ricadono con-

venzionalmente nella terza Generazione (Gen. III) o terza Generazione avanzata (Gen. III+).

Si tratta di impianti caratterizzati da un'elevata potenza unitaria, spesso indicati come full scale, per distinguerli dai reattori di taglia più piccola pensati per operare in parecchie unità concentrate in un medesimo sito, in modo modulare²⁴.

Nella Figura 21 viene mostrata la suddivisione in "Generazioni" degli impianti elettronucleari, che è da ritenersi convenzionale e indicativa dell'evoluzione della tecnologia nucleare commerciale degli ultimi decenni.

Le tecnologie nucleari, infatti, sono oggetto di aggiornamento continuo, come tutte le applicazioni tecnologiche di cui l'uomo si serve. Ecco che uno stesso progetto di impianto nucleare, se realizzato in tempi e località diverse, può, in certi casi, inglobare innovazioni rispetto alla realizzazione precedente senza per questo rendere la versione precedente meno funzionale o meno sicura.

Appartiene alla Seconda Generazione, la maggior parte dei 441 reattori di potenza in funzione oggi nel mondo. Si tratta di reattori sicuri, efficienti e nella maggior parte dei casi idonei ad operare e a fornire energia elettrica ancora per diversi decenni e che hanno ricevuto la licenza di esercizio o la licenza di *life extension* dalle competenti autorità nazionali ed internazionali. Un reattore della Terza Generazione (e Terza Generazione Avanzata) è semplicemente più performante di quello della generazione precedente (maggiore potenza a parità di ingombro, migliore utilizzo del combustibile, realizzazione e gestione semplificata, manutenzione più efficiente, ecc.) ed è dotato in genere di sistemi di sicurezza in grado di far fronte e mitigare, in modo ancora più efficiente rispetto alle generazioni precedenti, gli eventi incidentali più estremi o anche diverse combinazioni di questi, anche se le probabilità di accadimento sono, comunque, molto basse.

Sono reattori progettati e realizzati a partire

Componente impiantistica / caratteristica generale	Criterio
nocciolo	$K_{eff} > 1$ ai neutroni ritardati
	spettro neutronico termico
moderatore	acqua
refrigerante	acqua
ECCS (Emergency Core Cooling System)	preferibilmente passivo
filiera	solo filiere con più di un impianto già in esercizio da alcuni anni
tecnologia costruttiva	preferibilmente modulare
taglia	full scale

Tabella 9 - Criteri tecnici per l'individuazione dei reattori di pronto utilizzo (in via esemplificativa)

dagli anni '90 (convenzionalmente la Gen. III è operativa in Giappone già dal 1996, con il primo ABWR della GE-Hitachi) con ulteriori evoluzioni rispetto alla generazione precedente, di seguito brevemente riassunti:

- Maggiore ricorso alla standardizzazione nei componenti e del layout di impianto per accelerare la concessione di licenze, ridurre i costi di capitale e ridurre i tempi di costruzione.
- Design più semplice e robusto, orientato alla rapidità di intervento e manutenzione: reattori quindi meno vulnerabili a problemi operativi.
- Fattori di utilizzo più elevati e vita operativa più lunga, in genere 60 anni, ulteriormente estendibile.
- Probabilità di incidenti ulteriormente ridotta e introduzione di nuovi sistemi di mitigazione degli incidenti severi.
- In seguito ad arresto veloce, l'impianto non necessita di alcun intervento attivo per (tipicamente) 72 ore.
- Edifici di contenimento ulteriormente rinforzati per resistere all'impatto con aeromobili.
- Caratteristiche di sicurezza passiva o intrinseca che non richiedono controlli attivi o interventi da parte dell'operatore in caso di malfunzionamento (per alcuni progetti): i sistemi di sicurezza fanno affidamento sulla gravità, sulla convezione naturale o sulla resistenza alle alte temperature.
- Progettazione ottimizzata per adattarsi alle variazioni del carico: l'unità può variare la sua potenza in uscita dal 25% al 100%

in meno di 30 minuti per meglio adattarsi alle richieste della rete (caso dell'EPR di EDF-Framatome)

- Modularità dei componenti e dei sistemi: ampio ricorso al pre-assemblaggio e al test in fabbrica. I moduli (alcuni fino a 1000 t) sono già progettati per facilitarne il trasporto, il sollevamento e l'installazione: ciò comporta una riduzione dei tempi di costruzione in sito (caso dell'AP-1000 di Westinghouse).

Ovviamente non tutti gli aspetti sopra sinteticamente descritti sono puntualmente implementati in tutti i modelli: alcuni progetti privilegiano aspetti come un'architettura semplificata e l'uso di sistemi di sicurezza passivi, laddove altri (la maggioranza), a fronte di una relativa maggiore complessità impiantistica, fanno largo uso di sistemi ridondati per far fronte ai guasti o a qualsiasi altra condizione che devii da quelle di esercizio.

Fatta questa debita premessa, ciò che è emerso dall'indagine è sostanzialmente un insieme di progetti potenzialmente idonei all'installazione in Italia, preselezionati, sia sulla base di criteri tecnici e di considerazioni che tengono conto dello specifico contesto nazionale (geopolitico, industriale, territoriale, sociale), sia sulla base del successo commerciale dimostrato (con tutte le implicazioni tecnico-economiche che ciò comporta).

Questo primo insieme di alternative non è, chiaramente, da ritenersi definitivo ma fornisce già un set ristretto tra le quali scegliere.

Relativamente ai criteri tecnici, questi possono, molto sinteticamente e in via esemplificativa, riassumersi nella Tabella 9.

Di seguito si fornisce una sintetica nota esplicativa dei criteri sopra indicati:

- $K_{\text{eff}} > 1$ ai neutroni ritardati: il K_{eff} è un parametro dell'Ingegneria del nocciolo definito come fattore di moltiplicazione, cioè il rapporto delle densità medie di neutroni appartenenti a due generazioni successive. I neutroni presenti nel nocciolo, andando a collidere con gli isotopi fissili dell'Uranio causano la fissione del nucleo, il quale si scinde in due prodotti di fissione e altre particelle nucleari, tra cui ancora neutroni. Immaginando di fotografare tutti i neutroni presenti in un certo istante all'interno del nocciolo e quindi di ripetere la fotografia in un istante successivo quando tutti neutroni precedenti hanno generato la fissione, si ha che i neutroni della seconda fotografia rappresentano la generazione successiva e il rapporto tra la densità dei primi con i secondi rappresenta il fattore di moltiplicazione. A questo punto è possibile effettuare un'ulteriore precisazione: i neutroni presenti all'interno del nocciolo provengono, in effetti, sia dalle reazioni di fissione, sia dal decadimento radioattivo di alcuni prodotti di fissione che decadono emettendo uno o più neutroni. I primi si definiscono "neutroni pronti", i secondi "neutroni ritardati" perché, evidentemente, si generano solo successivamente alla reazione di fissione. Il fattore di moltiplicazione, quindi, può tenere conto o non tener conto dei suddetti neutroni ritardati. Nel primo caso si parla di "coefficiente di moltiplicazione ai neutroni pronti" considerando solo un sottoinsieme

della popolazione neutronica effettivamente presente nel nocciolo, nel secondo di "coefficiente di moltiplicazione ai neutroni ritardati", quando si considerano tutti i neutroni esistenti nel nocciolo, a prescindere dalla loro provenienza.

I noccioli dei reattori nucleari possono essere classificati in due macro-categorie, noccioli nei quali la reazione di fissione viene realizzata da neutroni "veloci", con energie $> 0,1$ MeV ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule) e noccioli nei quali la reazione di fissione viene realizzata da neutroni "termici" che hanno una energia confrontabile con quella di agitazione termica; in tale caso è assunto il valore standard pari a $0,025 \text{ eV}$.

I neutroni pronti sono neutroni veloci e quindi sono gli unici che partecipano alle reazioni di fissione nella prima categoria di noccioli, i neutroni ritardati non sono veloci e possono partecipare alle reazioni di fissione solo nella seconda categoria di noccioli in cui tutti i neutroni possono indurre fissione purché adeguatamente rallentati (moderati) dal componente strutturale del reattore chiamato moderatore.

Nel primo caso si parla di reattori veloci nel secondo di reattori termici ed è da questa classificazione che nascono le definizioni di coefficiente di moltiplicazione di cui sopra: nei reattori veloci i neutroni ritardati non partecipano alla reazione di fissione e quindi si considera il coefficiente di moltiplicazione ai neutroni pronti, nei secondi si utilizza il coefficiente di moltiplicazione ai neutroni ritardati.

I valori del coefficiente di moltiplicazione



(sia nel caso in cui sia riferito ai neutroni pronti oppure ai ritardati) può essere <1 , $=1$, >1 ; se è <1 ciò implica che la densità dei neutroni della generazione successiva è minore della densità della generazione precedente, quindi la densità di neutroni va diminuendo e di conseguenza anche il nu-

mero di fissioni per unità di tempo, quindi la reazione a catena si va esaurendo (reattore sottocritico); se è $=1$ la densità dei neutroni resta costante, così come il numero di fissioni per unità di tempo, quindi la reazione a catena si auto sostiene (reattore critico); se è >1 la densità di neutroni va ad au-



Figura 22 - a) EPR presso la centrale nucleare di Flamanville (Francia) - Photo courtesy EDF Médiathèque. b) Rendering di una centrale nucleare con 2 unità APR-1400 (Fonte: KHNP)



Figura 23 - Fonte: <https://www.westinghousenuclear.com/new-plants/ap1000-pwr>



Figura 24 - Rendering di una centrale nucleare con 2 unità VVER-TOI (Fonte: Rosatom)



Figura 25 - Veduta delle due unità ABWR della centrale di Kashiwazaki-Kariwa, unità 6 e 7 in servizio dal 1996, Giappone, Fonte: Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc.

mentare, così come il numero di fissioni per unità di tempo, quindi la reazione a catena si incrementa (reattore supercritico).

Il reattore in condizioni stazionarie deve funzionare sempre con un nocciolo in condizioni di criticità ($K_{\text{eff}} = 1$) ma il nocciolo deve essere intrinsecamente supercriti-

co ($K_{\text{eff}} > 1$) in quanto occorre, istante per istante, compensare le fughe neutroniche attraverso le pareti del reattore, gli assorbimenti strutturali e il consumo del combustibile, per cui la configurazione critica viene raggiunta, in ogni istante, attraverso le barre di controllo, che, introducendo un assor-

Reattore Progettista	Potenza elettrica netta/unità Tipo	Sistemi di sicurezza / design	Progetto approvato da:	Impianti attualmente in esercizio (Paese, anno di inizio costruzione, anno di collegamento alla rete elettrica)
EPR AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	da 1580 a 1650 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	ASN, STUK, NRC, UKAEA, ONR ... Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Olkiluoto 3 (Finlandia, 2005, 2022) n.1 unità, Taishan 1 (Cina, 2010, 2018) n.1 unità, Taishan 2 (Cina, 2012, 2019)
EPR 2 o EPR 'New Model' AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	1650 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi ad elevata ridondanza, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	Progetto in corso di approvazione presso ASN	-
AP-1000 Westinghouse Nuclear USA 	da 1110 a 1170 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza passivi	NRC, ONR (?), Autorità per la sicurezza nucleare Cinese Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Sanmen 1 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità, Sanmen 2 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità, Haiyang 1 (Cina, 2009, 2018) n.1 unità, Haiyang 2 (Cina, 2010, 2018)
APR-1400 KHNP / KERCO Corea del Sud 	da 1350 a 1400 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete e in grado di resistere all'impatto con un aereo	KINS, NSSC, NRC, FANR Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Seoul 1 (Corea del Sud, 2008, 2016) n.1 unità, Seoul 2 (Corea del Sud, 2009, 2019) n.1 unità, Barakah 1 (UAE, 2012, 2020) n.1 unità, Barakah 2 (UAE, 2013, 2021) n.1 unità, Barakah 3 (UAE, 2014, 2022) n.1 unità, Shin Hanul 1 (Corea del Sud, 2012, 2022)
ABWR GE-Hitachi USA / Giappone 	da 1300 a 1320 MWe ad acqua leggera bollente BWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento in grado di resistere all'impatto con un aereo	MRA Japan, NRC 1997 - UKAE 2013	n.1 unità, Kashiwazaki-Kariwa 6 (Giappone, 1992, 1996) n.1 unità, Kashiwazaki-Kariwa 7 (Giappone, 1993, 1997) n.1 unità, Hamaoka 5 (Giappone, 2000, 2005)

Tabella 10.1 - Caratteristiche salienti dei principali reattori in esercizio e relativi siti
Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

Reattore Progettista	Potenza elettrica netta/unità Tipo	Sistemi di sicurezza / design	Progetto approvato da:	Impianti attualmente in esercizio (Paese, anno di inizio costruzione, anno di collegamento alla rete elettrica)
WWER-TOI (V-510)/ WWER-1300 OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 1255 a 1300 MWe ad acqua leggera pressurizzata * *WWER è l'acronimo con cui i russi designano i loro reattori ad acqua pressurizzata, concettualmente equivalenti ai PWR	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	2012 inizio dell'iter di certificazione in UK (stato attuale dell'istanza sconosciuto) Certificazione EUR (European Utility Requirements)	-
WWER-1200 (AES-2006) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 1113 a 1198 MWe	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	Autorità per la sicurezza nucleare, Russa, Bengalese, Turca, Bielorussa Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Novovoronezh II - 1 (Russia, 2008, 2016) n.1 unità, Novovoronezh II - 2 (Russia, 2009, 2015) n.1 unità, Leningrad II - 1 (Russia, 2008, 2018) n.1 unità, Leningrad II - 2 (Russia, 2010, 2020) n.1 unità, Belarussian 1 (Bielorussia, 2013, 2020)
WWER-1000 (V-392, V-412, V-428, V-528) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	da 917 MWe a 1060 MWe ad acqua leggera pressurizzata	Sistemi di sicurezza attivi e passivi, edificio di contenimento a doppia parete ed in grado di resistere all'impatto con un aereo	Atomic Energy Regulatory Board (AERB) of India, National Nuclear Safety Administration NNSA (Cina) Certificazione EUR (European Utility Requirements)	n.1 unità, Kudankulam 1 (India, 2002, 2013) n.1 unità, Kudankulam 2 (India, 2002, 2016) n.1 unità, Tianwan 1 (Cina, 1999, 2007) n.1 unità, Tianwan 2 (Cina, 2000, 2007) n.1 unità, Tianwan 3 (Cina, 2012, 2018) n.1 unità, Tianwan 4 (Cina, 2013, 2018)
ACP 1000 /ACPR 1000 HPR 1000 'Hualong One' CNNC & CGN Cina 	1090 MWe ad acqua leggera pressurizzata PWR	Sistemi di sicurezza attivi, edificio di contenimento in grado di resistere all'impatto con un aereo	National Nuclear Safety Administration NNSA (Cina), Pakistan Nuclear Regulatory Authority PNRA (Pakistan) Iter di certificazione EUR in corso	n.1 unità, Kanupp 2 (Pakistan, 2015, 2021) n.1 unità, Kanupp 3 (Pakistan, 2016, 2022) n.1 unità, Fuqing 5 (Cina, 2015, 2021) n.1 unità, Fuqing 6 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Hongyanhe 5 (Cina, 2015, 2021) n.1 unità, Hongyanhe 6 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Yangjiang 5 (Cina, 2013, 2018) n.1 unità, Yangjiang 6 (Cina, 2013, 2018)

Tabella 10.2 - Caratteristiche salienti dei principali reattori in esercizio e relativi siti

Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

bimento aggiuntivo, conducono il nocciolo alla criticità.

Quindi nel caso di reattori veloci il nocciolo deve essere supercritico, $K_{eff} > 1$, ai neutroni pronti, nel caso di reattore termico il nocciolo deve essere supercritico, $K_{eff} > 1$, ai neutroni ritardati. Quest'ultimo è il criterio individuato, il che implica che il reattore dovrà essere di tipo termico;

- spettro neutronico termico: è l'immediata conseguenza del criterio precedente, come sopra descritto. Si considerano, quindi, solo reattori con nocciolo nei quali la reazione di fissione viene realizzata da neutroni termici;
- moderatore acqua: l'utilizzo di reattori termici implica la presenza del moderatore e in coerenza con il criterio successivo che fa riferimento all'impiego di soli reattori già commercialmente affermati, la scelta cade sul moderatore più comunemente utilizzato

nei reattori termici, cioè l'acqua;

- refrigerante acqua: analogamente al punto precedente, il refrigerante più comunemente utilizzato nei reattori termici è l'acqua;
- ECCS preferibilmente passivo: la tecnologia degli impianti nucleari si è orientata ormai da anni nella predilezione, su più filiere e trasversalmente alle varie generazioni, di sistemi di refrigerazioni di emergenza del nocciolo basati sui principi della fisica, piuttosto che su componenti impiantistici, definendo così il modello di reattore a "sicurezza intrinseca";
- solo filiere con più di un impianto già in esercizio da alcuni anni: è l'esplicitazione del criterio già sopra accennato, che consiste nel considerare solo impianti già commercialmente affermati, dei quali pertanto si conosce perfettamente la componentistica e le modalità di conduzione;
- tecnologia costruttiva preferibilmente mo-

Reattore Progettista	Impianti in costruzione (Paese, anno di inizio costruzione, anno previsto di entrata in servizio)	Impianti pianificati	Costo complessivo (in base al numero di unità contemporaneamente in costruzione sul medesimo sito) e costo unitario (costo in € per kWe installato)
EPR AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	n.1 unità, Flamanville 3 (Francia, 2007, 2023) n.2 unità, Hinkley Point C (UK, 2017, 2027)	n.2 unità, Sizewell C (UK)	Okiluto 3: 11 G€, 6875€/kWe Taichan 1 e 2: 6,8 G€, 2430€/kWe Hinkley point C (previsione): 18 G€, 5520€/kWe Flamanville 3 (consumivo attuale): 12,7 G€, 7700€/kWe Sizewell C (previsione): 23,6 G€, 7240€/kWe
EPR 2 o EPR 'New Model' AREVA NP (EDF) FRAMATOME AN Francia 	-	n.2 unità (EPR 2 in corso di valutazione per il sito di Perly (Francia) Altri Paesi interessati: Slovacchia (n/a http://www.jess.sk/en/)	EDF-Framatome stima una riduzione dei costi intorno al 30% rispetto all' EPR base
AP-1000 Westinghouse Nuclear USA 	n.1 Unità Vogtle 3 (USA, 2013, 2023) n.1 Unità Vogtle 4 (USA, 2013, 2023) n.1 unità, Haiyang 3 (Cina, 2022, 2030)* n.3 unità, Sanmen 3 (Cina, 2022, 2030)* * versione CAP-1000	n. 3 unità già pianificate per il sito di Lubiatowa-Kapalino, Polonia. Opzione per altre 3 o 6 unità in Polonia. La tecnologia Westinghouse AP1000 è in corso di valutazione, oltre che nel Regno Unito e negli USA anche da parte di alcuni Paesi dell'Europa centrale e orientale, tra cui l'Ucraina, nell'ambito di un programma che punta a schierare 9 unità.	Vogtle 3 e 4: 23,3 G€, 10370 €/kWe * Il costo "overnight" (2018) a partire dalla decima unità realizzata dovrebbe attestarsi tra 2600€/kWe e 3600€/kWe ** * costi elevati per i ritardi accumulati in seguito al fallimento della utility che originariamente aveva commissionato i reattori, alla pandemia Covid-19 e al fallimento della stessa Westinghouse nel 2018 (dal 2022 Westinghouse Electric Company è di proprietà di CAMECO e Brookfield Renewable Partners) ** Studio del MIT
APR-1400 KHNP / KEPCO Corea del Sud 	n.1 unità, Shin Hanul 1 (Corea del Sud, 2019, 2023) n.1 unità, Seoul 3 (Corea del Sud, 2017, 2025) n.1 unità, Seoul 4 (Corea del Sud, 2018, 2026) n.1 unità, Borsakh 4 (UAE, 2015, 2023)	-	Shin Hanul 1: 5,3 G€, 3950€/kWe Borsakh 1, 2, 3, e 4: 18,9 G€, 2540€/kWe
ABWR GE-Hitachi USA/ Giappone 	n.1 unità, Oama 1 (Giappone, 2010, -) n.1 unità, Oama 2 (Giappone, 2006, -) n.1 unità, Lungmen 1 (Taiwan, 1999, costruzione sospesa) n.1 unità Lungmen 2 (Taiwan, 1999, costruzione sospesa)	4 unità valutate per il UK 2 unità inizialmente pianificate da TEPCO per il sito di Higashi-dai, sospese nel 2011.	~3600 €/kWe (costo stimato e attualizzato a fine 2022 per le unità ABWR in costruzione a Taiwan)

Tabella 11.1 - Principali reattori in costruzione e costi di installazione
 Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

duolare: è il recente modello di costruzione che si sta affermando, che consente mediante la standardizzazione di componenti preassemblati in fabbrica, di aumentare ulteriormente la qualità e quindi la sicurezza, con riduzione dei costi e dei tempi di costruzione dell'impianto;

- taglia full scale: gli impianti nucleari, in relazione alla taglia, possono essere classificati in due categorie, full scale, di potenza elettrica superiore ai 300 MWe, che si attesta normalmente intorno i 1000 MWe, oppure SMR (Small Modular Reactor), di potenza inferiore ai 300 MWe. Quest'ultima tipologia d'impianto risulta estremamente interessante e vi sono studi in corso e prototipi in via di realizzazione relativi a diverse decine di filiere proposte, ma vi sono ancora poche applicazioni industriali e

quindi vi è una bassa esperienza d'uso.

Come in tutte le cose, non esiste uno standard assoluto, universalmente valido, non fanno eccezione gli impianti elettronucleari. Ciò che si può fare per indirizzare al meglio le scelte che si dovranno operare è fornire una classifica delle alternative, scelte tra un apposito insieme, che meglio si adattano al contesto italiano, come già più volte accennato in questo rapporto.

Un simile approccio trova la sua validità e giustificazione nel fatto che i criteri, qualitativi e quantitativi, che si utilizzano per preferire un'opzione tra le altre, sono molteplici e spesso interdipendenti tra loro e possono assumere un peso diverso a seconda dell'alternativa che si considera di volta in volta ma anche in relazione al momento nel quale si intende effettuare la scelta (quest'aspetto sarà chiarito nel seguito). La ricerca effettuata sulle tecnologie nucleari di

Reattore Progettista	Impianti in costruzione (Paese, anno di inizio costruzione, anno previsto di entrata in servizio)	Impianti pianificati	Costo complessivo (in base al numero di unità contemporaneamente in costruzione sul medesimo sito) e costo unitario (costo in € per kWe installato)
WWER-TOI (V-510)/ WWER-1300 OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità Kursk NPP-II-1 (Kursk, Russia, 2018-2023) n.1 unità Kursk NPP-II-2 (Kursk, Russia, 2019-2024)	Nizhny Novgorod 1,2 Central/Kostroma 1,2 Smolensk II 1,2,3,4 Kursk II 3,4 Tatar	Kursk NPP-II-1,2: 3,5 GC. 2790 €/kWe Kursk NPP-II-3: 3,8 GC. 3050 €/kWe
WWER-1200 (AES-2006) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità, Baltic 1 (Russia, 2012, 2023) n.1 unità, Belarusan 2 (Bielorussia, 2014, 2023) n.1 unità, Rooppur 1 (Bangladesh, 2017, 2027) n.1 unità, Rooppur 2 (Bangladesh, 2018, 2028) n.1 unità, Akkuyu 1 (Turchia, 2018, 2028) n.1 unità, Akkuyu 2 (Turchia, 2020, 2030) n.1 unità, Akkuyu 3 (Turchia, 2021, 2031) n.1 unità, Akkuyu 4 (Turchia, 2022, 2032) n.1 unità, El Daba 1 (Egitto, 2022, Nd) n.1 unità, El Daba 2 (Egitto, 2022, Nd) n.1 unità, Tianwan 7 (Cina, 2021, 2030) n.1 unità, Tianwan 8 (Cina, 2022, 2030) n.1 unità, Xudobo 3 (Cina, 2021, 2030) n.1 unità, Xudobo 4 (Cina, 2022, 2030)	Hanhikivi (Finlandia): cancellato	ND
WWER-1000 (V-39Z, V-41Z, V-42B, V-52B) OKB GIDROPRESS - ROSATOM Federazione Russa 	n.1 unità, Kudankulam 3 (India, 2017, 2026) n.1 unità, Kudankulam 4 (India, 2017, 2026) n.1 unità, Kudankulam 5 (India, 2021, 2030) n.1 unità, Kudankulam 6 (India, 2021, 2030) n.1 unità, Buzhahr 2 (Iran, 2019, 2030)	Pianificate 2 unità per il sito di Belene (Bulgaria), successivamente cancellate	≈2000 €/kWe per Kudankulam 1 e 2 (consuntivo) 6,2 GC di budget per Kudankulam 5 e 6, ≈ 3100 €/kWe
ACP 1000 / ACPR 1000 / HPR 1000 'Hualong One' CNNC & CGN Cina 	n.1 unità, Changjiang 3 (Cina, 2021, Nd) n.1 unità, Changjiang 4 (Cina, 2021, Nd) n.1 unità, Fangchenggang 3 (Cina, 2015, 2022) n.1 unità, Fangchenggang 4 (Cina, 2016, Nd) n.1 unità, Sanacou 1 (Cina, 2022, Nd) n.1 unità, Sanacou 2 (Cina, 2022, Nd) n.1 unità, Taipingling 1 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Taipingling 2 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Zhangzhou 1 (Cina, 2019, Nd) n.1 unità, Zhangzhou 2 (Cina, 2020, Nd)	ND	ND

Tabella 11.2 - Principali reattori in costruzione e costi di installazione

Fonte: Commissione Ricerca e Reattori Innovativi - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma

potenza di pronto impiego è servita per definire, in base ai criteri sopra indicati, il set di alternative da analizzare al fine di indentificare l'impianto nucleare di potenza che meglio si adatterebbe al caso italiano, consentendo di predisporre per tempo tutti gli strumenti legislativi e normativi necessari a dispiegare un congruo numero di impianti elettronucleari sul territorio nazionale. I reattori sviluppati e costruiti, ad oggi in piena operazione, che negli ultimi 30 anni hanno incontrato il maggior successo commerciale e risultano preliminarmente idonei per il contesto nazionale in relazione ai criteri esaminati, sono i seguenti:

- APR-1400 (Corea del Sud);
- AP-1000 (USA);
- EPR (Francia);
- Hualong One (Cina), nelle sue varie versioni;
- VVER-1000/VVER-1200/VVER-TOI (Fede-

- razione Russa);
- ABWR (USA/Giappone).

Nella Tabella 10 (10.1 e 10.2) e nella Tabella 11 (11.1 e 11.2), sono state riportate le caratteristiche salienti dei principali progetti.

In particolare, vengono indicate le unità già in esercizio, quelle in costruzione, quelle programmate o in corso di valutazione/pianificazione. Laddove disponibili, sono stati riportati i costi unitari, overnight o a consuntivo, espressi in euro²⁵ per kWe installato (€/kWe).

I reattori elencati nelle Tabelle 10 e 11, costituiscono un primo set di alternative valide che potrà essere sottoposto, in una fase successiva, ad un'ulteriore valutazione per meglio indentificare la soluzione migliore nello scenario italiano. Tali alternative potranno, poi, essere tra loro confrontate sulla base di ulteriori criteri (tecnici e no, qualitativi e quantitativi), in parte già ben

Lo stato dell'arte (III Gen/III Gen+)

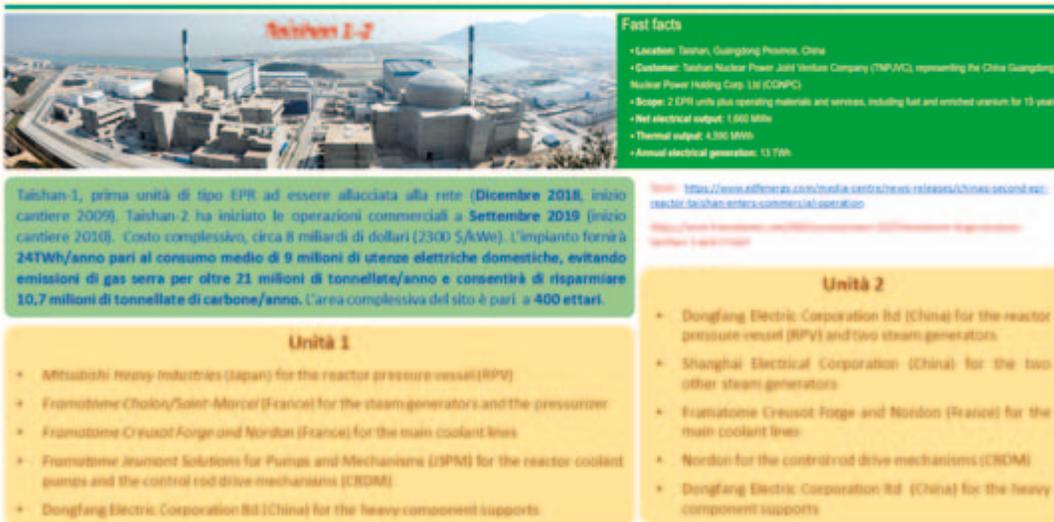


Figura 26 - Scheda riepilogativa della Centrale Nucleare di Taishan (Cina), basata su 2 unità EPR (prime unità di questo tipo ad entrare in servizio). La realizzazione della prima unità ha comportato un ricorso abbastanza ampio a forniture estere (Progettista e sue consorziate), nel corso della realizzazione dell'Unità 2 si è fatto ampio ricorso a forniture provenienti dall'industria nazionale, anche per i componenti principali del circuito primario.

definiti dalle canoniche procedure di localizzazione degli impianti nucleari e dalla normativa vigente (si vedano i riferimenti normativi nei Riferimenti normativi e tecnici) ed in parte derivati proprio dall'analisi di mercato.

Alcuni di questi criteri, descritti in via esemplificativa, sono particolarmente importanti nell'ambito della scelta. Fra questi:

- localizzazione in prossimità della costa: le potenze comprese nella fascia da 1100 MWe a 1700MWe per singola unità, richiedono grandi quantità di acqua, tali da rendere necessaria la localizzazione su aree in prossimità del mare o di fiumi di adeguata portata;
- aspetti economico-gestionali:
 - diffusione commerciale. È comprovato che il costo unitario (€/kWe installato) diminuisce con il numero di unità installate;
 - modularità: livello spinto di pre-assemblaggio in officina di sistemi e componenti, logistica di trasporto e montaggio semplificata;
 - numero di unità nello stesso sito l'economia di scala può essere conseguita realizzando il maggior numero di unità possibili nello stesso sito; l'approccio risulta particolarmente efficace quando i lavori di costruzione delle varie unità si svolgono in parallelo in modo da ottimizzare la logistica;
 - il ricorso alla realizzazione su licenza

delle parti principali dell'impianto contribuisce ad abbassare i costi della logistica e conseguentemente il costo dell'impianto nel suo complesso (esempio Figura 22), consolidando o contribuendo allo sviluppo economico locale. È un aspetto strategico che necessita dell'assistenza dello Stato, soprattutto nella fase di negoziazione con il fornitore del progetto ed il relativo Paese di appartenenza;

- tempi di realizzazione: dall'inizio della costruzione al primo collegamento alla rete elettrica le informazioni sono discordanti. Design relativamente più semplici, come ad esempio l'AP 1000, hanno registrato gli stessi tempi di costruzione dei reattori con architetture più complesse come l'APR1400; ciò è sicuramente vero per i FOAK se si escludono i ritardi dovuti al fallimento, per ragioni finanziarie contingenti, dei soggetti che avevano commissionato l'impianto (caso, ad esempio, delle due unità AP-1000 di Vogtle, USA).
- disponibilità di suolo: il particolare contesto italiano, dove la minimizzazione dell'impatto paesaggistico è di rilevante importanza e la disponibilità di aree di potenziale installazione è limitata, seppur sufficiente al dispiegamento di un congruo numero di unità di grande potenza, spinge verso soluzioni

a ridotta impronta, ossia impianti a maggior densità di potenza per m² di suolo occupato (il cosiddetto 'footprint' dell'impianto) risulterebbero potenzialmente favoriti.

Un esempio particolarmente efficace è rappresentato dal confronto tra il reattore Westinghouse installato nella centrale nucleare di Sizewell (unità B, convenzionalmente appartenente alla II Gen, inizio costruzione 1988 e collegamento alla rete elettrica avvenuto nel 1995) nel Regno Unito e l'AP-1000 attualmente proposto sul mercato dalla stessa Westinghouse. A parità di potenza elettrica netta installata (1188 MWe, per il primo e 1110 MWe per l'AP-1000), l'AP-1000 ha un ingombro ridotto, circa un quarto delle dimensioni del suo 'predecessore', richiedendo per la realizzazione della parte civile un quantitativo di acciaio e calcestruzzo inferiore di un fattore cinque:

- Sizewell B: 520000 m³ di calcestruzzo (438 m³/MWe), 65000 t di acciaio di armatura (55 t/MWe);
- AP-1000: <100000 m³ di calcestruzzo (90 m³/MWe, <12000 t di acciaio di armatura (11 t/MWe).

Questo stesso criterio/vincolo, tuttavia, fornisce un interessante spunto di riflessione, direttamente collegato al successivo criterio.

- disponibilità di aree occupate da centrali elettriche convenzionali dismesse o in fase di dismissione, localizzate in prossimità della costa; in Italia potrebbe essere privilegiato il recupero ed il riutilizzo di aree già impiegate a scopi energetici e già dotate delle necessarie infrastrutture (collegamento alla rete AT nazionale, vicinanza con infrastrutture stradali, ferroviarie e portuali ecc.) come quelle delle ex centrali termoelettriche.

A questi vantaggi si unisce il fatto che il territorio può essere già dotato di un indotto idoneo e di maestranze già formate e re-impiegabili nel contesto del cantiere, nell'esercizio e nella manutenzione. Tale aspetto sarà approfondito nel successivo paragrafo "Criteri e requisiti per la localizzazione degli impianti nucleari sul territorio nazionale". Un tale criterio favorirebbe il dispiegamento di gruppi di SMR insieme a impianti full scale.

- standardizzazione e consolidamento delle procedure di licensing: come noto il rilascio

	Pre-licensing	Licensing steps
Canada	(Licence to prepare site) Pre-Licensing Vendor Design Review: an optional service provided by the CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission) when requested by a vendor	1. Licence to prepare site 2. Licence to construct 3. Licence to operate
Czech Republic		1. Site licence 2. Construction licence 3. A number of 'small' licences for particular commissioning stages 4. Operating licence
France	ASN (Autorité de sûreté nucléaire) opinion on safety options (review of safety options)	1. Authorization decree for the creation of a basic nuclear installation 2. Licence for the commissioning of the installation
Germany	'Pre-statement' on project aspects (e.g. design) in the Nuclear Energy Act but never used	1. Construction licence in several steps (the first one being a type of design approval) 2. Operating licence in several steps
Japan		1. Site selection phase: environmental review 2. Preparation phase for construction: reactor installation licence, safety examination, construction plan 3. Construction phase: pre-service inspection, operational safety program 4. Operation phase: periodical inspection, safety inspection
Korea	Standard design approval for new design	1. Construction licence 2. Operating licence

Tabella 12.1 - Fasi di pre-licensing e licensing di alcuni Paesi

Fonte: Licensing and Project Development of New Nuclear Plants, World Nuclear Association

della licenza di costruzione ed esercizio avviene sulla base dell' analisi di sicurezza ed è un processo molto variabile da nazione a nazione; la Tabella 12 (12.1 e 12.2), fornisce un quadro sintetico delle fasi di pre-licensing e licensing di alcuni paesi; nel caso italiano il potenziamento dell'ente regolatore nucleare e l'approvazione di un congruo apparato normativo - legislativo rappresentano una condizione indispensabile, per la re-introduzione dell'energia nucleare nel mix energetico nazionale.

L' Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica ha messo a punto diversi strumenti e stabilito una apposita roadmap per assistere i paesi che intendono dotarsi di centrali elettronucleari. Infine, la possibilità da parte dell'ente regolatore nazionale di adottare un iter autorizzativo già utilizzato con successo da parte di altri enti regolatori su progetti di comprovata affidabilità e sicurezza costituisce un criterio molto selettivo per l'individuazione della migliore alternativa. La probabilità che l'applicazione per l'ottenimento della licenza di esercizio sia coronata da successo, con un iter di durata

ben stabilita, è maggiore per progetti già licenziati da altri paesi e per l'installazione in località e contesti con caratteristiche affini a quelle Italiane;

- fattori geopolitici: tensioni internazionali, adesione ad organismi sovranazionali, interessi trasversali potrebbero far escludere a priori soluzioni potenzialmente idonee; ad esempio, i reattori russi delle serie VVER-1000/VVER-1200, costituiscono indubbiamente un successo commerciale, al pari dei progetti occidentali, di cui ricalcano prestazioni, layout, caratteristiche di sicurezza, e rispetto ai quali possono vantare un costo e tempi di realizzazione inferiori: tuttavia le tensioni dovute alla guerra russo-ucraina e le misure sanzionatorie adottate verso la Federazione Russa possono certamente precludere la scelta dei reattori russi.

	Pre-licensing	Licensing steps
South Africa		Both options (one-step or multi-step) are available. Depending on the application, the NNR (National Nuclear Regulator) could issue the following types of authorizations for nuclear installations: a) Nuclear installation licence (NIL) to site, construct and or operate or decontaminate or decommission the installation b) Nuclear installation site licence (NISL) for new installations c) Nuclear authorization to design a nuclear installation d) Nuclear authorization to manufacture components/parts
Ukraine	Operator can ask authority to do a safety review of a design Feasible sites are on a list to be established by government	1. Construction licence (including commissioning) with afterwards a number of regulatory hold points (e.g. first delivery of nuclear fuel, first criticality, commissioning, experimental operation phase) 2. Operating licence
UK	GDA (Generic Design Assessment)	Nuclear site licence. Establishes hold points/consent points, typically: • First nuclear concrete • First nuclear island construction • First fuel brought to site • Start of active commissioning
US	Design certification Early site permit	10 CFR part 52: COL (combined construction and operating licence) 10 CFR part 50: 1. Construction licence 2. Operating licence

Tabella 12.2 - Fasi di pre-licensing e licensing di alcuni Paesi

Fonte: Licensing and ProjectDevelopment of New Nuclear Plants, World nuclear Association



5. CRITERI E REQUISITI PER LA LOCALIZZAZIONE DEGLI IMPIANTI NUCLEARI SUL TERRITORIO NAZIONALE



La localizzazione delle centrali elettronucleari di potenza richiede un'analisi preventiva di criteri e requisiti tecnici e normativi da applicare sul territorio nazionale al fine di selezionare le aree suscettibili di insediamento della tecnologia individuata. Nel seguito questi requisiti vengono esaminati sinteticamente.

Preliminarmente si evidenzia che l'applicabilità di un piano energetico nazionale, che comprenda anche l'utilizzo di energia da fonte nucleare, richiede che l'ubicazione delle nuove centrali nucleari di potenza, basate su tecnologie disponibili ed economicamente accettabili (escludendo, quindi, impianti sperimentali o di tipo

non qualificato dagli enti di controllo in materia nucleare), sia individuata nelle aree che soddisfano i requisiti minimi necessari al loro funzionamento, cioè: presenza di sufficiente acqua per il raffreddamento, allaccio alla rete elettrica nazionale, idonee vie di accesso, ecc. .

Inoltre, le aree del territorio nazionale, sulle quali le centrali nucleari verranno realizzate, devono possedere, in base a criteri predefiniti e condivisi anche a livello internazionale, altri requisiti e caratteristiche quali:

- le aree siano valutate dal punto di vista geologico, sismico e geotecnico al fine

di acquisire le caratteristiche del territorio e confrontarle con soluzioni progettuali e costruttive di impianto tecnologicamente sperimentate ed economicamente accettabili in grado di garantire la resistenza dei terreni di fondazione delle strutture e dei componenti importanti per la sicurezza della centrale;

- le aree siano valutate dal punto di vista idrogeologico e meteorologico in relazione alle esigenze del progetto nucleare;
- vengano escluse le aree all'interno delle quali siano presenti attività umane estranee all'impianto nucleare (per es.: industrie, manufatti) che possono innescare il verificarsi di eventi limite (incidenti) incompatibili con la sicurezza di funzionamento delle centrali;
- siano escluse le aree all'interno delle quali possono verificarsi fenomeni naturali estremi, diversi dal sisma, quali alluvioni, frane, maremoti, di intensità tali da compromettere la sicurezza di funzionamento delle centrali;
- vengano escluse le aree soggette a vincoli naturalistici per la presenza al loro interno di ecosistemi di particolare pregio.

Completata l'analisi delle aree idonee, la scelta puntuale dei siti sarà basata su considerazioni di pianificazione territoriale concordate con le autorità regionali.

Attualmente, in Italia, sono presenti quattro località che hanno ospitato centrali nucleari di potenza: Caorso (PC), Trino Vercellese (VC), Borgo Sabotino (LT) e Sessa Aurunca (CE). Montalto di Castro (VT) costituisce la quinta località all'interno della quale era in corso di realizzazione una centrale nucleare al momento dell'abbandono della produzione di energia elettronucleare.

L'Italia è stato ed è un Paese fortemente industrializzato e con una lunga tradizione tecnologica nel settore della produzione di energia elettrica.

A tal riguardo, nella Tabella 13, sono elencate, a titolo esemplificativo, le aree industriali che ospitano le centrali nucleari non più in esercizio e le principali centrali termoelettriche (la maggior parte delle quali dismesse o in via di dismissione) per una potenza totale installata pari a circa 16560 MWe.

È auspicabile che nella realizzazione di un piano energetico integrato, diversificato e decarboniz-

Numero	Società elettrica	Impianto	Potenza (MWe)	Sito
1	ENEL	Alessandro Volta (termoelettrica)	3600	Montalto di Castro VT
2	ENEL	Centrale di Porto Tolle	2640	Porto Tolle RO
3	ENEL	Centrale di Rossano	1738	Rossano CS
4	ENEL	Ettore Majorana	1341	Termini Imerese PA
5	ENEL	Centrale di Torre del Sale	1280	Piombino LI
6	SOGIN	Centrale nucleare di Caorso	860	Caorso PC
7	ENEL	Galileo Ferraris (termoelettrica)	690	Trino Vercellese VC
8	Edipower	Centrale di Brindisi	640	Brindisi BR
9	ENEL	Centrale di Maddaloni	352	Maddaloni CE
10	ENEL	Centrale di Portoscuso	320	fraz. Portovesme Portoscuso SU
11	ENEL	Centrale di Marzocco	310	Livorno LI
12	ENEL	Centrale di Genova	295	Genova GE
13	SOGIN	Centrale nucleare Enrico Fermi	260	Trino Vercellese VC
14	ENEL	Centrale di Larino	250	Larino CB
15	ENEL	Centrale di Augusta	210	Augusta SR
16	ENEL	Centrale di Bari	206	fraz. Stanic Bari BA
17	SOGIN	Centrale nucleare di Latina	200	fraz. Borgo Sabotino Latina LT
18	ENEL	Centrale di Carpi	182	Carpi MO
19	ENEL	Centrale di Assemini	177	Assemini CA
20	ENEL	Centrale di Alessandria	176	Alessandria AL
21	SOGIN	Centrale nucleare del Garigliano	160	Sessa Aurunca CE
22	ENEL	Pietro Vannucci	150	Gualdo Cattaneo PG
23	ENEL	Giuseppe Volpi	140	Porto Marghera VE
24	ENEL	Centrale di Camerata Picena	104	Camerata Picena AN
25	Edison	Centrale Acerra Sogetel	100	Acerra NA
26	ENEL	Centrale di Giugliano	90	Giugliano in Campania NA
27	ENEL	Centrale di Campomarino	88,8	Campomarino CB

Tabella 13 - Centrali elettriche dismesse installate sul territorio italiano in ordine di potenza decrescente

zato, che miri ad un'autonomia della produzione energetica nazionale, tutte le regioni italiane, in proporzione al carico elettrico richiesto alla rete nazionale, vengano attivamente coinvolte, sia nella produzione autonoma di energia da fonti prevalentemente *carbon-free*, sia nella produzione di energia stabile con la realizzazione di nuovi impianti energetici che utilizzino fonti locali e/o nucleari.

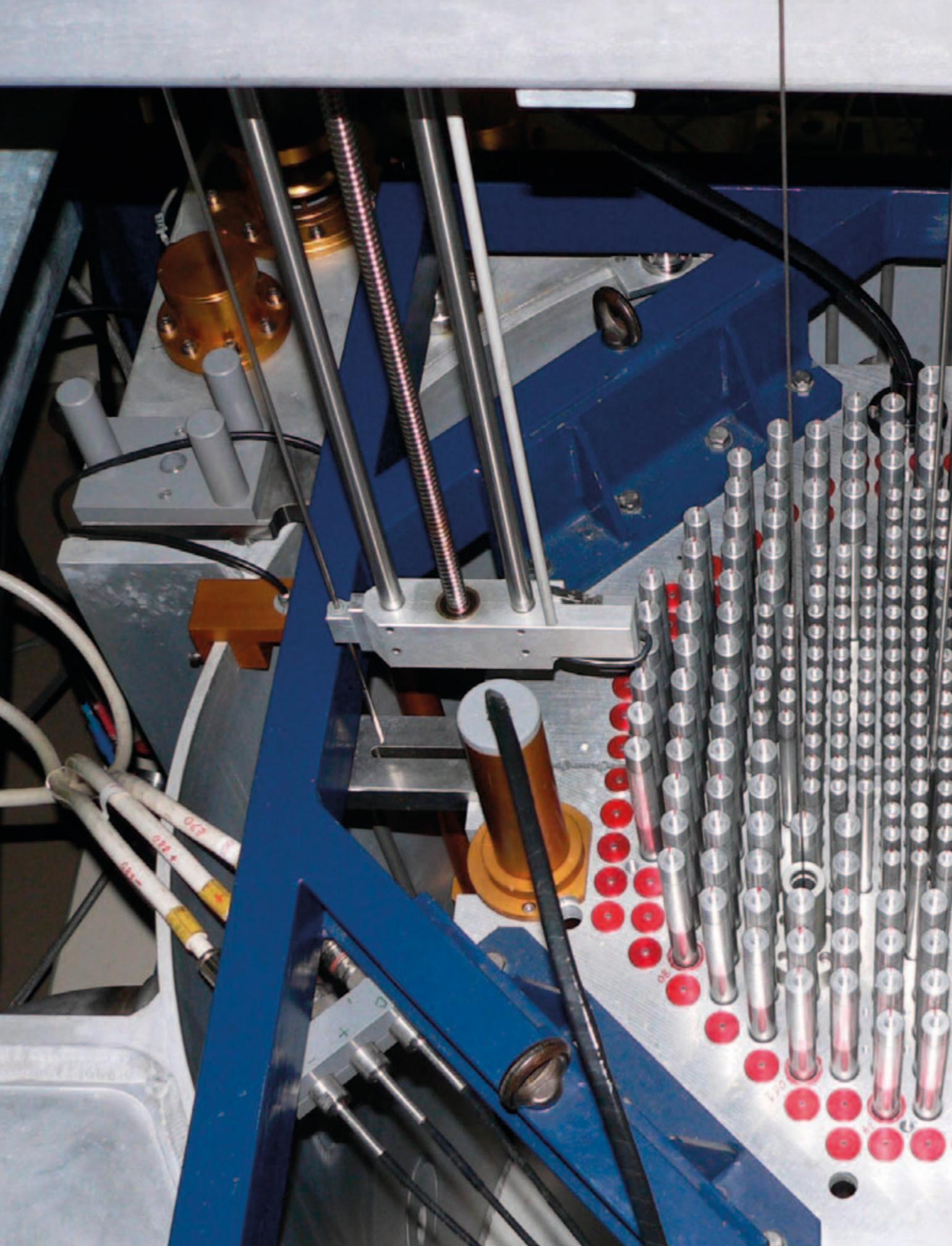
Le regioni che non hanno la possibilità di installare centrali elettronucleari, perché non possiedono i requisiti descritti in precedenza, dovrebbero poter, comunque, contribuire all'impegno nazionale complessivo con forme di compensazione economica derivanti dal bilancio locale, o compensazioni equivalenti, per poter usufruire dell'energia *carbon free* (nucleare e FER) autoprodotta in eccesso da altre regioni. È anche auspicabile che, per abbreviare i tempi

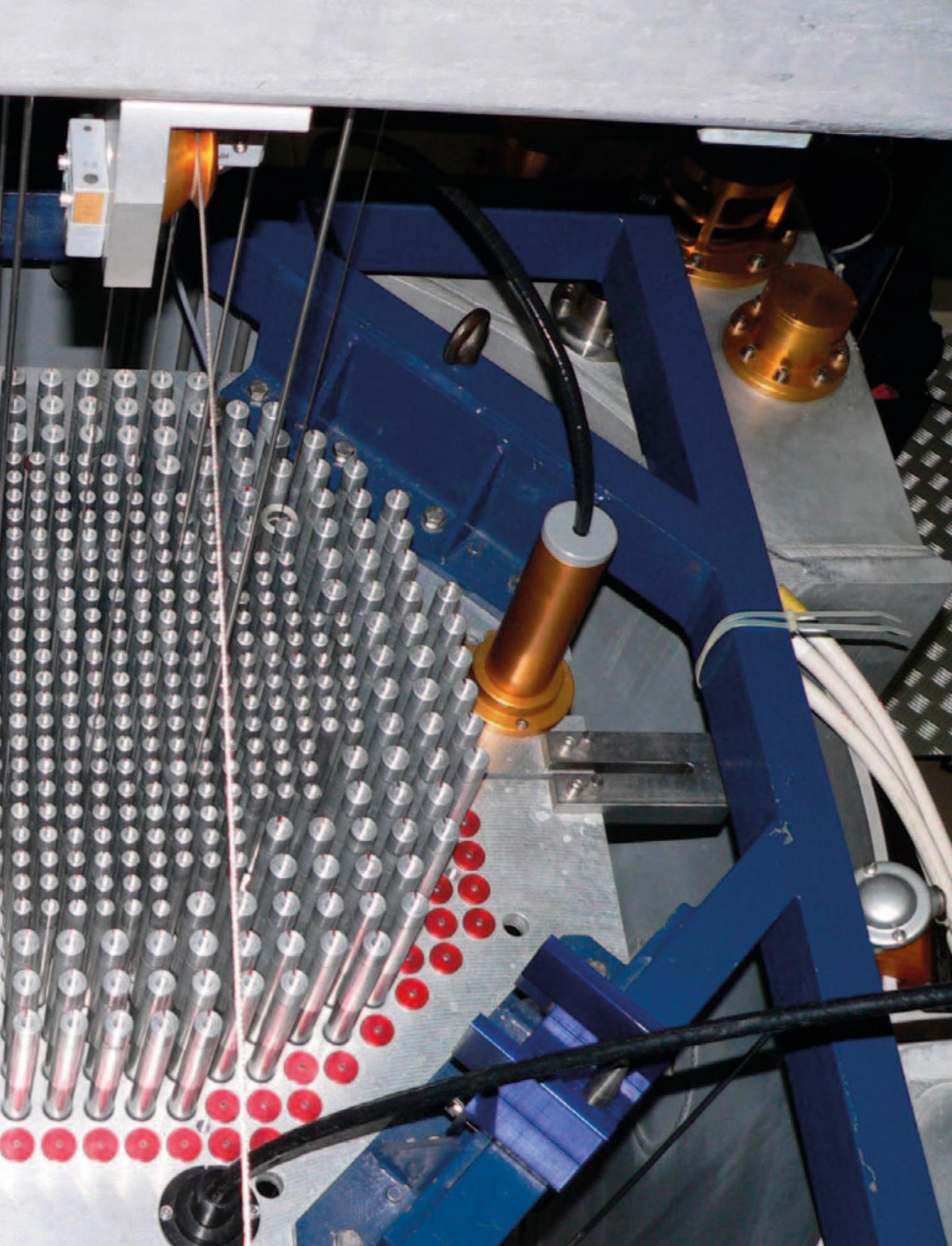
della localizzazione, vengano esaminati in primis tutti i siti che hanno già ospitato impianti nucleari, energetici, industriali e militari, in quanto questi siti potrebbero già essere qualificati per quelle attività e disponibili per costruzioni industriali poiché la popolazione residente possiede già familiarità con tali installazioni, e spesso buona parte della popolazione è stata già coinvolta a livello occupazionale o nell'indotto.

Non vanno, poi, dimenticati i siti già individuati e selezionati in precedenti piani energetici nazionali (PEN) come, ad esempio, quelli inseriti nel Piano Unificato Nazionale (PUN), se compatibili con i requisiti del progetto nucleare.

Si ritiene, inoltre, utile che, in sede di localizzazione degli impianti, venga esaminata l'adozione di misure per le comunità ospitanti, quali: detassazione, incentivazione, viabilità, occupazione, sviluppo sociale ed economico.







6. RICERCA E FORMAZIONE

La fusione nucleare nel futuro energetico

La fusione nucleare è il fenomeno fisico che ha luogo in tutte le stelle, incluso il sole.

Il combustibile è un plasma, ossia un gas di particelle cariche dotate di energia sufficiente a produrre reazioni nucleari tra di loro.

La fusione nucleare di due nuclei consiste nella formazione di un unico nucleo a partire da due nuclei reagenti, con emissione di particelle e/o radiazione. In sostanza può essere considerato il processo opposto alla fissione nucleare che decorre dalla scissione di un nucleo.

Quando le particelle interagenti sono gli ioni deuterio (isotopo dell'idrogeno), i prodotti, secondo i due canali principali della reazione, sono elio tre più un neutrone e trizio (altro isotopo dell'idrogeno) più un protone. L'energia generata da ogni reazione è elevata (milioni di volte quella di una reazione chimica).

I programmi di ricerca internazionali, orientati allo sviluppo di reattori in grado di produrre energia, prevedono l'utilizzo di una miscela di reagenti composta di deuterio e trizio con un

rapporto stechiometrico pari a uno. Il trizio è l'isotopo più pesante e radioattivo dell'idrogeno; non esiste in natura e deve essere prodotto mediante una reazione nucleare che utilizza neutroni generati dalla stessa reazione di fusione tra deuterio e trizio, all'interno di una zona del reattore, detta blanket, dedicata a questa funzione. Il motivo principale per cui i programmi di studio reattoristici prevedono l'utilizzo di questa miscela piuttosto che l'utilizzo del solo deuterio risiede nel fatto che questa reazione ha una temperatura di ignizione (alcune decine di milioni di gradi) che è circa sei volte inferiore rispetto alla reazione con solo deuterio.

Questo processo consentirà di ottenere energia rinnovabile, in grado di sostituire i combustibili fossili con benefico effetto per quanto concerne il programma di decarbonizzazione.

I progetti finalizzati alla costruzione del reattore sono ITER e DEMO.

ITER è un progetto internazionale con un valore di oltre 20 miliardi di euro, al quale partecipano: UE, USA, Cina, Giappone, India, Corea del Sud e Russia. Lo studio è stato concepito per dimostrare la fattibilità della produzione di energia da fusione e la macchina sperimentale è in corso di costruzione in Francia, nel centro di ricerche di Cadarache. La realizzazione del progetto costituisce una grande impresa sia tecnologica che di ingegneria, con un traguardo scientifico di altissima valen-



za. Tutto il programma è basato sulla sinergia tra mondo dell'industria e mondo della ricerca.

DEMO rappresenta la continuazione del lavoro rivolto alla costruzione di un reattore in grado di produrre energia elettrica da immettere nella rete. L'impianto, che dovrebbe entrare in funzione nel 2050, sarà il primo reattore dimostrativo, e la sua progettazione utilizzerà il patrimonio di conoscenze ottenuto con la sperimentazione di ITER.

In Italia è in corso di realizzazione un apparato sperimentale di grande importanza strategica: DTT (Divertor Tokamak Test Facility). Questo programma di ricerca prevede investimenti sia pubblici che privati per circa 500 milioni di euro e consentirà la creazione di numerosi posti di lavoro.

Il DTT, che, come si è detto, sarà realizzato in Italia, avrà il contributo della UE.

Il progetto è stato ideato da ENEA, nell'ambito di una collaborazione con ENI, CNR, INFN, Consorzio RFX, CREATE e alcune prestigiose università italiane. L'attività è dedicata allo studio del divertore (importante componente esposto al plasma) di DEMO e costituisce un collegamento tra i grandi progetti internazionali di fusione nucleare precedentemente menzionati.

La ricerca nucleare: i reattori di IV Generazione

La ricerca nel campo della fissione nucleare non si è mai arrestata e nell'arco degli anni sono

stati proposti e sviluppati nuovi concetti di reattori nucleari. Negli ultimi anni hanno avuto un importante sviluppo i reattori cosiddetti di IV Generazione (Gen.-IV), insieme ai reattori modulari (SMR, Small Modular Reactors).

Con il progresso della tecnologia alcuni di tali reattori avanzati risultano in fase di prototipazione e alcuni già in costruzione come progetti dimostrativi in vari Paesi.

I reattori Gen.-IV sono reattori nucleari a fissione classificabili in sei tipologie selezionate dal GIF (Generation IV International Forum), fondato dal Dipartimento di Stato dell'Energia degli Stati Uniti nel 2001 e ora composto da 13 membri rappresentanti di altrettanti Paesi, inclusa l'Unione Europea.

Gli obiettivi Gen.-IV sono definiti in quattro grandi aree:

1. Migliorare la sostenibilità: la sostenibilità è la capacità di soddisfare i bisogni presenti senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare i propri bisogni. Nella GIF Technology Roadmap (GIF, 2002), gli obiettivi di sostenibilità sono definiti con particolare attenzione alla gestione dei rifiuti e all'utilizzo delle risorse.
2. Assicurare la competitività economica: si tratta di un requisito imposto dal mercato ed è essenziale per i reattori nucleari di



quarta generazione. I futuri sistemi di energia nucleare dovrebbero essere aperti a varie opzioni industriali e poter essere utilizzati per una gamma più ampia di prodotti energetici oltre alla produzione elettrica.

3. Sicurezza e affidabilità: i reattori nucleari di quarta generazione rafforzano l'approccio di difesa in profondità e utilizzano caratteristiche innovative per fornire sicurezza intrinseca.
4. Resistenza alla proliferazione e protezione fisica: oltre all'applicazione delle salvaguardie internazionali, le tecnologie avanzate dei reattori di quarta generazione promuovono l'integrazione dei requisiti di sicurezza, protezione e salvaguardia nella progettazione di nuovi cicli del combustibile e dei reattori stessi.

Dei sei tipi di tecnologie selezionate per lo sviluppo dei futuri reattori Gen.-IV, tre sono nominalmente classificabili come reattori termici e altri tre come reattori autofertilizzanti a neutroni veloci, anche se alcuni possono essere teoricamente implementati sia come termici sia come veloci. I reattori a neutroni veloci hanno il vantaggio di poter bruciare gli elementi della serie degli attinidi e di produrre più combustibile nucleare di quello che consumano.

I sei tipi di reattori sono:

1. VHTR (Very-High-Temperature Reactor), di tipo termico, usa elio come fluido refrigerante.
2. SFR (Sodium-cooled Fast Reactor) di tipo veloce, usa sodio come fluido refrigerante.
3. SCWR (Super-Critical-Water-cooled Re-



- actor), di tipo termico/veloce, usa acqua come fluido refrigerante.
4. GFR (Gas-cooled Fast Reactor), di tipo veloce, usa elio come fluido refrigerante.
 5. LFR (Lead-cooled Fast Reactor), di tipo veloce, usa piombo come fluido refrigerante.
 6. MSR (Molten Salt Reactor), di tipo termico/veloce, usa sali di fluoruro come fluido refrigerante.

Alcune configurazioni di reattori di quarta generazione - Gen. IV sono mirate anche alla produzione di idrogeno che notoriamente richiede alte temperature e delicati processi per la sua produzione.

Gli alti rendimenti termodinamici di questi reattori, infatti, potranno incentivare la produzione di questo vettore energetico, che notoriamente

non si trova in natura allo stato libero.

Gli SMR, invece, potranno risultare appetibili per la produzione di acqua calda e vapore e per la produzione di energia, in ambito civile (teleriscaldamento) e in ambito industriale a servizio, ad esempio, delle grandi raffinerie, grandi acciaierie, grandi complessi ospedalieri che in parte già provvedono all'autoproduzione di energia in sinergia con la rete di distribuzione di energia elettrica.

Conclusioni

Negli ultimi decenni le scelte energetiche a livello nazionale dei Governi che si sono succeduti, hanno portato il nostro Paese ad una condizione di dipendenza pressoché totale dai Paesi esteri,



compresi quelli politicamente meno stabili, ed hanno inevitabilmente condotto la nostra economia reale ad una contrazione, causa del declino di quasi tutte le attività produttive, investendo per primi i settori industriali e manifatturieri. Tali scelte, poi, sono state anche la conseguenza del mix energetico attuale, con il quale viene prodotta energia termoelettrica a significativo impatto ambientale, in quanto prevalentemente basato sull'utilizzo di materie prime fossili. Il solo fabbisogno di gas naturale attuale, importato dall'estero, è, infatti, di circa 76 miliardi di metri cubi all'anno.

L'esigenza di un nuovo piano energetico che assicuri l'indipendenza dell'approvvigionamento energetico nel nostro Paese, limitando il più possibile di esporlo a prezzi di acquisto non controllabili e calmierabili, e in linea con la sostenibilità ambientale e con le sfide che la transizione digitale a livello internazionale impone, diventa, dunque, un'emergenza imprescindibile.

In tal senso la scelta di inserire nel mix energetico del piano proposto la componente elettronucleare da fissione accanto a tecnologie che utilizzano fonti rinnovabili risulta essere opportuna. Alla base della proposta, frutto di analisi tecnico-scientifiche e di visioni ingegneristiche basate su un approccio razionale improntato a fornire una soluzione realistica al problema, c'è la consapevolezza che per perseguire l'obiettivo della sostenibilità energetica si debbano utilizzare in modo ponderato e funzionale tutte le risorse a disposizione nel territorio.

Nel Rapporto sono stati selezionati preliminarmente, secondo parametri di sicurezza e di efficienza, i reattori nucleari di pronto impiego, già in funzione in tutto il resto del mondo, più adatti ad essere collocati sul territorio italiano in base alle sue peculiarità, alle sue potenzialità ed al fabbisogno energetico.

Allo stesso tempo sono stati evidenziati i requisiti generali funzionali alla reintroduzione della tecnologia nucleare, compreso naturalmente il deposito nazionale per i rifiuti radioattivi e un'adeguata rete infrastrutturale di servizi.

È stata condotta anche un'analisi sintetica dei costi-benefici relativa alla produzione di energia elettronucleare, dalla quale è emerso, a fronte di un elevato investimento di partenza, un costo competitivo del kWh e un favorevole ritorno economico nel corso degli anni successivi, come, peraltro, dimostrato anche con analoghe simulazioni dall'IAEA.

Si auspica, in tal senso, che possano essere messi in atto nel breve periodo tutti quegli interventi indispensabili per integrare sul territorio le proposte avanzate, partendo dalla semplificazione della normativa per la localizzazione ed installazione degli impianti nucleari preposti alla produzione termoelettrica e da un opportuno e mirato adeguamento legislativo e istituzionale, ivi compreso un rafforzamento degli organi di controllo.

Si ritengono, a tal fine, fondamentali e imprescindibili:

- una maggiore centralità di ISIN, ENEA, SOGIN che si occupano a livello nazionale anche di energia nucleare;
- il potenziamento del ruolo delle aziende nazionali che si occupano della progettazione delle infrastrutture strategiche;
- lo stanziamento nell'immediato di un fondo per la realizzazione di un nuovo piano energetico.

Investire su una produzione di energia sicura e affidabile, diventata un bene indispensabile e inalienabile in questo particolare momento storico, e raggiungere l'obiettivo di autonomia energetica è un atto di responsabilità da assumere per il bene della società e per la crescita e lo sviluppo economico del Paese.

È con questa convinzione che la Commissione Ricerca e Reattori Innovativi dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma ha redatto il presente Rapporto tecnico-scientifico, con l'auspicio di poter fornire uno strumento di riferimento operativo che possa in futuro essere ulteriormente sviluppato a livello progettuale e contribuire alla crescita tecnologica, infrastrutturale e sociale del nostro Paese.







APPENDICE

Allegato 1. – Un metodo di analisi per il supporto alla scelta della tecnologia

79

La scelta della tecnologia nucleare da destinare ad un determinato territorio può essere supportata e implementata con metodi decisionali multicriterio, come il metodo *Analytic Hierarchy Process* - AHP.

L'AHP è uno strumento matematico potente utilizzato per operare scelte complesse, dato un set di alternative. L'output del metodo AHP è una classifica delle alternative nella quale è possibile identificare univocamente le migliori. Elementi essenziali delle alternative sono "il confronto a coppie" e la definizione di un opportuno "set di criteri".

Posto, ad esempio, come obiettivo la scelta dell'impianto nucleare più adatto per un determinato contesto, e individuate le alternative in base ai criteri e ai requisiti che il progetto nucleare richiede, si potrà applicare il metodo AHP definendo un set di criteri (tecnico-logistici, economici, politici, sociali) in base ai quali confrontare le alternative attraverso il confronto a coppie.

Il risultato sarà un ranking parziale delle alternative rispetto a ciascun criterio.

Gli stessi criteri saranno oggetto di confronto a coppie da parte del team di esperti allo scopo di determinarne i pesi relativi rispetto all'obiettivo.

Infine, attraverso un procedimento matematico, noto come composizione gerarchica, si otterrà il vettore dei pesi globali delle alternative rispetto all'obiettivo, ossia la classifica finale. Il metodo AHP presenta tutta una serie di vantaggi:

- è un metodo di consolidato utilizzo ed affidabilità, utilizzato da enti, governi e organismi sovranazionali, per operare scelte strategiche;
- si presta a verifiche indipendenti;
- si può utilizzare, a seconda del contesto e dell'output desiderato, in modalità "pura" o ibrida con altre tecniche decisionali;
- consente di schematizzare problemi complessi senza trascurare "i dettagli" evitando quelle semplificazioni che altrimenti non garantirebbero la convergenza verso una soluzione (come, ad esempio, nella ricerca operativa con le funzioni obiettivo);
- consente, per sua stessa definizione, di mediare i giudizi e quindi di livellarne la soggettività;
- il metodo include tutta una serie di indicatori per verificarne la corretta applicazione;
- in ambito nucleare (inclusa la selezione delle tipologie di impianto), l'AHP può contare su di un'importante letteratura scientifica di riferimento.

Reattore	Potenza Netta (MW _e)	Investimento o totale (miliardi USD)	Unità Operative	Costo kW installato (USD)	Costo kWh (USD)
APR-1400	1345	24,4	4	4535	0,09

Tabella 14 - Costo del kWh per un reattore APR-1400 (considerando un fattore di capacità del 92% e un'inflazione media del 3%)

Riferimenti

- A framework for the selection of the right nuclear power plant (POLIMI).
- Using AHP (Analytic Hierarchy Process) to choose optimal NPP design (Florida, USA).
- Methodology for Gen IV Reactor Technology selection with sensitivity analysis for future Nuclear Power Expansion Programmes (Cina).
- Reactor technology assessment utilizing Engineering Approach (KEPKO).

Allegato 2. - Costi-benefici di un impianto nucleare full scale

Il consumo energetico dovuto alla produzione industriale nazionale può essere considerato un fattore produttivo associato al prodotto interno lordo (PIL): all'aumentare del consumo energetico dovuto all'industria si ha, necessariamente, un aumento del PIL.

Anche in ambito civile un aumento del consumo energetico può correlarsi ad una funzione di produttività poiché contribuisce, a sua volta, all'aumento del PIL e determina un conseguente miglioramento della qualità del benessere della popolazione che lo farà a sua volta crescere. La proporzionalità dell'aumento del consumo energetico industriale e civile associato al PIL è, ovviamente, diversa, con il consumo industriale direttamente ad esso correlabile.

La suddetta premessa è fondamentale per evidenziare l'importanza di un sistema di produzione energetica nazionale autosufficiente e prestazionale.

Nell'ambito di una analisi preliminare costi-benefici, bisogna specificare che l'energia nucleare è una tecnologia capital intensive, poiché il costo di costruzione dell'impianto impatta per circa i 2/3 sul costo del kWh e il costo del combustibile impatta solo per circa il 5%.

Al fine di valutare il costo finale del kWh è stato scelto come riferimento l'impianto nucleare APR-1400 in esercizio negli Emirati Arabi Uniti presso il sito di Barakah.

La vita operativa dell'impianto APR-1400 è stata estesa da 40 a 60 anni. L'APR1400 è progettato per far fronte a terremoti che soddisfano tutti i

requisiti sismici di 0,3 g nel substrato roccioso utilizzando per le condizioni del suolo un concetto di involucro del sito. L'accelerazione del suolo di picco di 0,3 g è stata validata da diversi fornitori di reattori avanzati come base per lo standard di riferimento *Safe Shutdown Earthquake*. Con l'introduzione di un metodo di progettazione del layout a quadrante per gli edifici ausiliari, poi, è stata rafforzata anche la capacità di far fronte a shock esterni, sia che si tratti di incendi che di allagamenti.

La schematizzazione dell'APR1400 può riassumersi in un reattore ad acqua pressurizzata (PWR) che dispone di due circuiti di raffreddamento con generatori di vapore verticali con tubo a U che includono economizzatori integrati. Il nocciolo del reattore ha 241 gruppi di combustibile e l'unità è progettata per funzionare con un ciclo di rifornimento di 18 mesi.

È già prevista una versione avanzata in grado di avere un ciclo di rifornimento di 24 mesi e 257 gruppi di combustibile.

Nel novembre 2017, KEPCO E&C e Korea Hydro & Nuclear Power (KHNP) hanno ottenuto la certificazione *European Utility Requirements* (EUR) per il suo EU-APR, che secondo la KEPCO "è un Advanced Light Water Reactor evoluto", pienamente conforme ai requisiti sia dell'UE che ai codici europei e standard.

Questo reattore, inoltre, è stato in grado di acquisire la certificazione di progettazione dell'APR1400 dalla *Nuclear Regulatory Commission* (NRC) degli Stati Uniti nell'agosto 2019.

La *Emirates Nuclear Energy Corporation*²⁶ (ENEC) ha stipulato vari accordi commerciali per l'ammontare complessivo di 24,4²⁷ miliardi di USD per la costruzione, manutenzione e decommissioning di 4 reattori da 1345 MW, con operatività prevista di 60 anni.

La Tabella 14 riassume il costo del kWh tenendo conto del fattore di capacità del 92% ed attualizzato considerando, in maniera conservativa, un'inflazione media del 3%.

Il fabbisogno annuale italiano è pari a circa 318,6 TWh/a; pertanto, il 30% del nostro fabbisogno annuale potrebbe essere coperto con circa 10 unità APR-1400.

Allegato 3. - La Sicurezza Nucleare

Una centrale nucleare produce energia elettrica sfruttando l'energia meccanica prodotta dalla evaporazione di acqua riscaldata dal calore generato dalla reazione di fissione dell'isotopo ^{235}U dell'Uranio, che avviene nel nocciolo (core) del reattore. Il vapore prodotto viene convogliato in una turbina che, collegata ad un turbo-generatore, trasforma l'energia meccanica in potenza elettrica da distribuire nella rete.

Il principio di funzionamento è analogo a quello che si ha nelle centrali che utilizzano come combustibile le fonti fossili convenzionali (carbone, gas, ecc.): l'energia prodotta dalla combustione riscalda l'acqua il cui vapore fa girare una turbina che, attraverso una "dinamo", produce energia elettrica che può essere immessa in rete.

Tale analogia di funzionamento fa sì che tutta l'esperienza maturata nel campo della sicurezza applicata agli impianti termoelettrici che producono energia dal vapore possa essere reciprocamente utilizzata nella progettazione delle varie filiere e tipologie di centrali nucleari, accrescendo la sicurezza ed il funzionamento del sistema complessivo.

Una centrale nucleare per uso civile possiede un elevato ed efficace sistema di sicurezza che viene sviluppato già nella sua fase di progettazione e la sua costruzione è connessa ad un'attenta e approfondita analisi delle prestazioni e dei rischi. Su questi ultimi si opera affinché siano minimizzati già a livello di progetto.

La sicurezza nucleare ed i problemi ad essa direttamente o indirettamente associati sono sempre stati, fin dai primi esperimenti di Enrico Fermi sulla materia, oggetto di particolare attenzione nei processi di progettazione, costruzione, esercizio e smantellamento degli impianti nucleari.

Il reattore nucleare, che costituisce il core di un impianto, produce sostanze radioattive di diversa natura. Queste comprendono: prodotti di fissione e nuclei di elementi pesanti generati all'interno del combustibile, fluidi contaminati dal contatto con le barre di combustibile e materiali strutturali resi radioattivi dall'irraggiamento neutronico.

I sistemi ad elevata sicurezza presenti, costantemente monitorati, studiati e aggiornati, sono finalizzati ad evitare che questi materiali radioattivi siano rilasciati nell'ambiente esterno, anche a fronte di malfunzionamenti dell'impianto, atti dolosi o eventi severi. Questo richiede che, a partire dalla fase di progettazione degli impianti nucleari, vengano previste una serie di "barriere" successive, idonee a fronteggiare in modo adeguato qualsiasi eventuale incidente²⁸.

Inoltre, per garantire ulteriormente la sicurezza di funzionamento nelle centrali nucleari esistono i cosiddetti "moderatori" e "assorbitori" che hanno il compito di rallentare i neutroni e assorbirli in modo da mantenere sotto controllo la reazione nucleare.

L'aspetto della "sicurezza nucleare", inteso come l'insieme di tutte le misure di tipo ingegneristico e gestionale che devono essere ob-



bligatoriamente adottate e rispettate in tutti gli impianti nucleari, siano essi esistenti o di futura realizzazione, in tutto il loro ciclo di vita, dalla fase di costruzione fino alla fase di decommissioning, risulta essere di fondamentale importanza al fine di prevenire eventuali incidenti e di mitigarne le eventuali conseguenze.

Le centrali nucleari, in quanto "sistemi" che forniscono servizi ritenuti di primaria necessità per i cittadini e per il sistema economico e industriale di un Paese, vengono classificate e trattate come "infrastrutture critiche" in quanto parte di un sistema strategico ritenuto essenziale per la funzionalità di una nazione.

Questo è un ulteriore elemento che caratterizza la qualità e l'efficacia di un sistema di sicurezza. Pertanto, qualsiasi azione o evento che provochi il malfunzionamento di una infrastruttura critica, siano essi eventi naturali, accidentali o attività terroristiche o di carattere doloso, devono essere prevenuti e opportunamente contrastati adottando adeguati sistemi di sicurezza, tipicamente normati da specifiche raccomandazioni tecniche riconosciute a livello internazionale.

La sicurezza di un impianto nucleare richiede una accurata fase di progettazione, durante la quale è necessario individuare le migliori soluzioni da adottare al fine di minimizzare le potenziali situazioni di pericolo che possono far salire il livello della potenza oltre il valore nominale di

riferimento. I prodotti utilizzati devono essere esenti da difetti al fine di ridurre possibili guasti. L'impianto, costruito, come si è detto, a regola d'arte, è, poi, dotato di un'articolata serie di complessi sistemi di protezione che ha lo scopo di mitigare gli effetti di un eventuale incidente.

Un altro aspetto importante riguarda la scelta del sito dove collocare la centrale che dovrà possedere specifici requisiti.

La fine del ciclo di vita di un impianto nucleare, dopo il suo spegnimento²⁹, prevede un'azione di *decommissioning* (la rimozione del combustibile esaurito che sarà, poi, inviato presso specifici impianti per procedere al suo riprocessamento), un'azione di mantenimento in sicurezza di queste strutture, l'allontanamento in zone protette del combustibile nucleare esaurito, la decontaminazione e smantellamento delle installazioni, la gestione e la messa in sicurezza dei rifiuti radioattivi. Anche la dismissione e lo smantellamento degli impianti nucleari rappresentano un'attività ad alto valore economico, sociale e ambientale. Tale attività richiede l'utilizzo di tecnologie avanzate e un elevato e specifico *know how*.

Nel ciclo di vita della sicurezza viene considerato anche il ciclo dei rifiuti radioattivi prodotti dall'utilizzo energetico e non energetico, cioè, proveniente dalle attività di medicina nucleare, industriali e di ricerca scientifica.

Nel quadro generale dei problemi che riguarda-



no la sicurezza bisogna considerare, oltre alle centrali nucleari di potenza, anche gli impianti del ciclo del combustibile a partire dall'estrazione dell'uranio fino al trattamento del combustibile esaurito e all'immagazzinamento dei prodotti di fissione in esso contenuti.

Per raggiungere un elevato livello di sicurezza è sufficiente operare con la mentalità dell' "Ingegnere" ed applicare una metodologia sistematica e puntuale durante la fase preliminare di progettazione, all'interno della quale sviluppare un processo di analisi di tutte le possibili tipologie di rischio, sia interno che esterno all'impianto.

L'origine degli eventi che determinano un incidente di rilascio di prodotti radioattivi può essere interna, se causati da malfunzionamenti o rotture dell'impianto o da interventi non corretti da parte degli operatori, oppure possono essere esterni se causati da eventi naturali come terremoti, maremoti, tornado, allagamenti, o da eventi antropici come l'impatto di aerei/missili o anche atti malintenzionati (*malevolent acts*).

La finalità prioritaria di un sistema di sicurezza è quello di garantire e salvaguardare l'incolumità degli addetti e della popolazione nel caso di rilasci non controllati di prodotti radioattivi.

Per avere una efficace protezione degli impianti nucleari è necessario attivare, a diversi livelli e in maniera sistemica ed integrata, più linee di difesa, che comprendono un'attenta attività di

prevenzione, una corretta e continua rilevazione dello stato dell'impianto, un'immediata e coerente risposta ad eventi negativi.

Con riferimento agli impianti nucleari, il problema della sicurezza interessa, a diversi livelli, aspetti quali:

- a) la tecnologia (funzionamento fisico e resilienza strutturale dell'impianto e dei suoi singoli componenti);
- b) il comportamento dell'essere umano, che può essere attivo (cioè, voluto, intenzionale), se opera con dolo o incompetenza, o passivo (cioè, subito), nel caso della prevenzione e protezione dalle radiazioni e dagli incidenti che possono accadere;
- c) l'ambiente, in cui l'impianto, da un lato, subisce in modo passivo eventi come terremoti, maremoti, emergenze ambientali estreme ecc., dall'altro, in modo attivo, qualora contribuisse esso stesso all'inquinamento ambientale.

Tipicamente, in una centrale di terza generazione (la maggioranza di quelle attualmente in esercizio), vengono adottate una serie di barriere:

1. una prima barriera, costituita dalle guaine che racchiudono il combustibile (e quindi i prodotti di fissione);
2. una seconda barriera, costituita dall'involucro di contenimento del nocciolo che con-



- tiene il combustibile nucleare, l'eventuale moderatore e il fluido refrigerante;
- una terza barriera, costituita dall'edificio che racchiude sia il nocciolo che il circuito del refrigerante e che, in caso di incidente, viene completamente isolato.

Gli elementi che caratterizzano un'efficace garanzia per la sicurezza di un impianto nucleare sono i seguenti:

- un efficiente e aggiornato sistema normativo e legislativo, coordinato anche a livello internazionale;
- l'attuazione di idonee misure di sicurezza e protezione degli impianti, anche a livello preventivo e di piani di manutenzione;
- l'attuazione di idonee misure di sicurezza della logistica, collegata in particolare ai materiali sensibili;
- un sistema di controllo e tracciabilità per rilevare eventuali traffici illeciti di materiale nucleare/radioattivo (contaminato);
- la presenza di adeguate risorse umane qualificate e costantemente aggiornate dal punto di vista professionale;
- una efficace dotazione di strumentazione tecnologica di supporto costantemente aggiornata alle più recenti innovazioni;
- la divulgazione della cultura della security tra tutti gli attori dei processi;
- un efficace sistema informativo "dedicato" ed opportunamente integrato in una rete internazionale della sicurezza.

I sistemi di sicurezza sono studiati e realizzati per assicurare, in caso di ogni eventuale possibile incidente, l'arresto immediato della reazio-

ne di fissione, la rimozione del calore di decadimento e la prevenzione di qualsiasi rilascio di radioattività verso l'esterno.

In particolare, per assicurare la massima possibile affidabilità del sistema, tali funzioni di sicurezza vengono assicurate da una serie di sistemi speciali, il più delle volte indipendenti dai sistemi che assicurano il normale funzionamento dell'impianto, e progettati secondo criteri di ridondanza e di diversificazione.

La ricerca di un livello di sicurezza sempre maggiore ha portato negli ultimi anni allo sviluppo di dispositivi che, per il loro funzionamento, sfruttando semplici principi fisici come la gravità o la circolazione naturale dei fluidi, non richiedono alcun intervento umano né, tantomeno, l'utilizzo di sofisticate apparecchiature elettroniche.

L'attuale livello di sicurezza raggiunto dagli impianti nucleari, utilizzando le tecniche di analisi di affidabilità, permette di contenere le conseguenze negative di un eventuale incidente all'interno dell'impianto prevenendo, quindi, il rilascio di radiazioni verso l'esterno ed evitando impatti negativi sull'ambiente.

Tipicamente, il termine "sicurezza" viene associato a quegli incidenti che derivano da eventi di natura incidentale (colposa). In realtà, con una visione più ampia, il sostantivo "sicurezza" può essere declinato utilizzando due parole più specifiche: Safety & Security; in particolare, si parla di security (sicurezza) nel caso di azioni commesse deliberatamente, in maniera volontaria, mentre, si parla di safety in situazioni accidentali, involontarie.

Entrambe le attività di safety e di security sono finalizzate a ridurre e limitare il rischio derivante,



SOLAR PV



SOLAR CST



WIND



NUCLEAR



BIOMASS



GAS

sia da materiali nucleari radioattivi, sia dai complessi impianti di produzione energetica. Esse si focalizzano anche sull'errore umano incidentale; in particolare, la security pone un'attenzione agiuntiva e puntuale sulle azioni di origine dolosa. Le ripercussioni collaterali collegate ad un evento negativo in qualsiasi punto del ciclo di vita possono interessare:

- la perdita di vite umane;
- il danno fisiologico a breve-medio termine;
- il danno materiale;
- il danno economico;
- il danno reputazionale;
- l'impatto negativo sull'opinione pubblica.

La sicurezza nucleare richiede di mettere in atto tutte quelle misure legate alla sicurezza fisica (*physical security*), tra cui la capacità di una robusta protezione fisica perimetrale (controllo degli accessi, videosorveglianza, antintrusione attiva e passiva, tracciabilità dei movimenti di oggetti, materiali e persone all'interno delle aree protette ecc.), specifiche procedure e *policy* operative, sistema di comunicazioni delle emergenze, assetto delle risorse assegnate alla vigilanza interna, contatti e collaborazione operativa con l'insieme di corpi militari e civili dello Stato, o di enti pubblici territoriali interessati. Un efficace ed efficiente sistema di sicurezza deve prevedere anche un funzionale protocollo di sicurezza logica (*logical security*) in grado di proteggere il sistema dalle minacce tipicamente informatiche come *hackeraggi*, *worm*, *malware*, accesso illegale e non controllato ai dati, ai sistemi di monitoraggio *Supervisory Control And Data Acquisition*³⁰ (SCADA) che governano gli impianti, ecc. .

La sicurezza informatica assume in tal senso, un ruolo significativo, una funzione diretta a ridurre la vulnerabilità del sistema, e nel contempo, ad aumentarne la capacità resiliente.

Il complesso insieme dei sistemi logici che assicurano il funzionamento sicuro di una centrale nucleare, deve essere un sistema di tipo chiuso separato ed isolato dal mondo web.

Un elemento non trascurabile che caratterizza il "sistema di sicurezza" delle centrali nucleari è che esiste una ferrea normativa internazionale che disciplina le modalità operative e tecniche che stanno alla base della progettazione, realizzazione ed esercizio degli impianti nucleari.

Tale normativa si esplica su tre livelli: internazionale, europeo (nel nostro Paese) e locale.

A livello internazionale sono state istituite diverse organizzazioni che operano nel settore del nucleare; tra queste, ricordiamo: l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica³¹ (IAEA); l'Agenzia per l'Energia Nucleare presso l'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OECD/NEA); il Gruppo degli organismi regolatori europei nel campo della sicurezza nucleare (ENSREG) presso la Commissione Europea.

Nel campo dell'energia nucleare l'UE, avvalendosi dell'Euratom³², lasciando agli Stati membri la decisione di scegliere se includere o meno l'energia nucleare nel loro mix energetico³³, promuove, in tutta l'Europa, i più elevati standard di sicurezza nucleare finalizzando i propri interventi, sia al miglioramento degli standard di sicurezza delle centrali nucleari, sia a garantire che i rifiuti nucleari siano eliminati e trattati in modo sicuro.



HYDRO



GEOTHERMAL



POWER LINES



WASTE



COAL



BATTERY STORAGE

Con le Direttive 2009/71/EURATOM del 25 giugno 2009 e 2014/87/EURATOM dell'8 luglio 2014 (che istituiscono e definiscono un quadro comunitario per la sicurezza nucleare degli impianti nucleari), il Consiglio dell'Unione Europea intende:

- a) stabilire un quadro comunitario al fine di mantenere e promuovere il continuo miglioramento della sicurezza nucleare e della relativa regolamentazione;
- b) assicurare che gli Stati membri adottino adeguati provvedimenti in ambito nazionale per un elevato livello della sicurezza nucleare al fine di proteggere i lavoratori e la popolazione dai pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti degli impianti nucleari.

Le Direttive impongono alcuni obblighi per gli Stati membri, i quali:

- istituiscono e mantengono un quadro legislativo, normativo e organizzativo nazionale («quadro nazionale») per la sicurezza nucleare degli impianti nucleari;
- istituiscono una Autorità di regolamentazione competente in materia di sicurezza nucleare degli impianti nucleari che sia funzionalmente separata da ogni altro organismo o organizzazione coinvolto nella promozione o nell'utilizzazione dell'energia nucleare;
- effettuano, prima della costruzione di un impianto nucleare, una valutazione iniziale della sicurezza degli impianti;
- verificano lo stato della sicurezza degli impianti almeno ogni dieci anni;
- garantiscono ai lavoratori e alla popolazione l'accesso a informazioni trasparenti sugli impianti nucleari, sia durante il normale funzionamento che in caso di incidenti;
- organizzano delle autovalutazioni periodiche del quadro nazionale e delle autorità di regolamentazione ogni dieci anni.

Il Consiglio stabilisce che il primo responsabile in materia di sicurezza nucleare è il titolare dell'autorizzazione il quale non può in alcun caso delegare tale responsabilità e deve occuparsi della valutazione e del miglioramento continuo della sicurezza nucleare degli impianti.

La Direttiva sottolinea, inoltre, l'importanza del fattore umano nella promozione di una cultura di sicurezza nucleare e, quindi, la necessità di una educazione e una formazione ininterrotte del personale incaricato della sicurezza degli impianti.

L'UE promuove i più elevati standard di sicurezza nucleare in tutta Europa e oltre con un approccio integrato e coordinato.

I principali responsabili della sicurezza degli impianti nucleari sono i gestori degli impianti stessi che operano sotto la supervisione di autorità nazionali di regolamentazione indipendenti.

La sicurezza nucleare richiede un'ampia e diver-

sificata gamma di attività che comprendono:

- la garanzia del mantenimento di condizioni operative adeguate e sicure per gli impianti nucleari;
- la prevenzione degli incidenti;
- l'attenuazione delle eventuali conseguenze che dovessero verificarsi.

La Direttiva impone ai Paesi dell'UE di dare la massima priorità alla sicurezza nucleare in tutte le fasi del ciclo di vita di una centrale nucleare. Ciò include l'esecuzione di valutazione della sicurezza prima della costruzione di nuove centrali nucleari e la garanzia di significativi miglioramenti della sicurezza per i reattori con una lunga vita operativa. In particolare, la Direttiva:

- richiede una nuova valutazione della sicurezza per tutte le centrali nucleari da condurre almeno una volta ogni 10 anni;
- aumenta la trasparenza imponendo ai gestori delle centrali nucleari di divulgare informazioni al pubblico, sia in tempi di normale funzionamento che in caso di incidenti.

L'UE coopera con i Paesi terzi e le Organizzazioni internazionali in materia di sicurezza nucleare. La Commissione europea ha firmato un memorandum d'intesa con l'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) per rafforzare ulteriormente la cooperazione anche in materia di sicurezza nucleare, attraverso valutazioni *inter pares* di esperti, la preparazione e risposta alle emergenze, includendo settori emergenti di interesse comune, come l'istruzione e la formazione, i piccoli reattori modulari e la sicurezza degli impianti a fusione.

In Italia, attualmente, esiste l'ISIN (Ispettorato nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione) che è l'Autorità di regolamentazione, indipendente ai sensi delle Direttive Euratom, competente in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione. L'Ispettorato raccoglie l'eredità di tutte le funzioni in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione già attribuite, negli anni, dalla legislazione nazionale al CNEN, all'ENEA DISP, all'ANPA, all'APAT, al Dipartimento nucleare, rischio tecnologico e industriale, al Centro Nazionale per la sicurezza nucleare e la radioprotezione e all'Area Fisica del Centro Nazionale per la rete nazionale dei laboratori per le attività in materia di radioattività dell'ISPRa.

L'ISIN, istituito con il decreto legislativo n. 45 del 4 marzo 2014, recepisce la direttiva 2011/70/EURATOM volta ad istituire un quadro comunitario per la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi.

L'ISIN svolge i propri controlli a livello preventivo, in fase autorizzativa e, successivamente, durante le fasi di realizzazione e di esercizio, nel corso dello svolgimento di operazioni di *decommissio-*



ning, tramite specifiche attività di vigilanza. Pertanto, la normativa UE definisce la sicurezza nucleare (*nuclear safety*) come il “conseguimento di adeguate condizioni di esercizio, la prevenzione di incidenti e l’attenuazione delle loro conseguenze, al fine di assicurare la protezione dei lavoratori e della popolazione dai pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti degli impianti nucleari”. Per quanto riguarda i controlli di sicurezza nucleare (*nuclear safeguards*), per i quali la Commissione detiene la competenza esclusiva, essi “consistono in misure intese a garantire che le materie nucleari non vengano distolte dalle finalità dichiarate in origine. Gli utilizzatori e i detentori di materie nucleari nell’UE devono tenere un registro di tali materie e dichiarare alla Commissione tutti i flussi ad esse relativi”.

Con riferimento alla protezione nucleare (*nuclear security*), di competenza prevalentemente nazionale, essa è definita dall’AIEA come la “prevenzione e il rilevamento di atti criminosi o intenzionali non autorizzati riguardanti materie nucleari, altri materiali radioattivi, attrezzature o attività a questi associati, nonché la reazione a detti atti. La protezione fisica degli impianti nucleari e dei materiali radioattivi è connessa alle politiche in materia di difesa e sicurezza dei singoli paesi e ricade perlopiù nella loro sfera di competenza”.

Infine, alcune considerazioni sul termine “rischio”, elemento fondamentale che deve essere ben “compreso” nel suo vero significato, specialmente

in una campagna di comunicazione sul “nucleare”. Possiamo concludere che, considerando irraggiungibile nelle attività umane il concetto di rischio zero, possiamo con affermare con estrema confidenza che il rischio legato all’uso dell’energia nucleare in campo civile è tra i più bassi esistenti (confrontare dati statistici ENI, IEA, IAEA, NEA, ISIN) ed è confrontabile, se non inferiore per certi aspetti, a quelli normalmente applicati nella progettazione di sistemi e impianti nel campo aeronautico e spaziale: le centrali nucleari sono progettate e realizzate per raggiungere e mantenere operativamente la massima sicurezza di funzionamento tecnologicamente e fisicamente possibile i sistemi di sicurezza nucleare vengono sempre aggiornati potendosi avvalere, dell’evoluzione della tecnologia frutto di numerosi studi ed esperienze.

Comunemente viene definito “rischio” la potenzialità da parte di una specifica azione di determinare una conseguenza negativa, cioè un danno. Il rischio è caratterizzato da due fattori: la “probabilità” che l’evento negativo si verifichi e la “gravità” dell’evento negativo considerato.

Per una valutazione ragionata del rischio i due fattori, che sono entrambi di fondamentale importanza, dovrebbero sempre essere considerati insieme per evitare che la percezione “personale” associ un peso troppo elevato alla componente delle conseguenze reali del danno, senza bilanciarla con la componente probabilistica.



Allegato 4. - La Radioprotezione

LA RADIOATTIVITÀ NATURALE

L'uomo è naturalmente esposto alla radioattività, sia artificiale che naturale. La radioattività naturale comprende due componenti di diversa origine, una terrestre e una cosmica. La componente di origine terrestre è dovuta ai radionuclidi presenti in varie quantità nella crosta terrestre, "primordiali" perché presenti nelle rocce fin dalla formazione del pianeta. La componente di origine naturale determina il maggior contributo alla dose annua ricevuta dalla popolazione mondiale secondo il rapporto Unsclear 2000, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiations, presentato all'Assemblea generale dell'Onu.

L'esposizione al radon e ai suoi isotopi contribuisce per più del 50% al fondo naturale di radiazione (2,4 mSv annui). Il fondo naturale di radioattività varia territorialmente in base alla diversa composizione del suolo, alcune aree del pianeta sono particolarmente ricche di minerali radioattivi, rocce ad alte concentrazioni di uranio e di torio e terre rare come la monazite, ad esempio le spiagge di Ramsar in Iran, Guarapari in Brasile, il Kerala in India, e Yangjiang in Cina oppure Arkaroola in Australia.

Esistono catene radioattive alle quali apparten-

gono tutti i radionuclidi naturali: la serie del torio, dell'uranio e del potassio 40. I radionuclidi da cui il radon ha origine sono presenti in tutti i tipi di rocce e di terreno con una quantità variabile, l'uranio è distribuito ovunque sul pianeta e presenta una concentrazione media nella crosta terrestre di 2,8ppm, nel granito di 4,5ppm e nell'acqua di mare di 3ppb.

L'esposizione esterna dovuta agli elementi radioattivi terrestri dipende dalla loro concentrazione nel suolo e quindi varia con la posizione geografica e analogamente l'esposizione interna varia con essa e con il tipo di alimentazione. La componente cosmica ha origine nello spazio ed è costituita dai raggi cosmici e dai radionuclidi cosmogenici. I raggi cosmici si originano nello spazio galattico e interagiscono con i nuclei negli strati più alti dell'atmosfera, producendo sciami di radiazione secondaria (neutroni, pioni, X, y ed elettroni), mentre i radionuclidi cosmogenici (*C, H, Be, Na*) sono prodotti continuamente da reazioni nucleari tra raggi cosmici e nuclei presenti nell'atmosfera, nella litosfera e idrosfera.

L'intensità della radiazione cosmica varia con l'altitudine: le popolazioni che vivono in regioni montane possono ricevere dosi da due a tre volte maggiori di quelle ricevute al livello del mare. Anche i viaggi aerei espongono i passeggeri alle radiazioni cosmiche.

<i>Sorgente</i>	<i>Dose efficace annuale media della popolazione mondiale (mSv)</i>	<i>Range tipico (mSv)</i>
Esposizione esterna		
Raggi cosmici	0.4	0.3 – 1.0 ^a
Radiazione gamma terrestre	0.5	0.3 – 0.6 ^b
Esposizione interna		
Inalazione (principalmente radon)	1.2	0.2 – 10 ^c
Ingestione	0.3	0.2 – 0.8 ^d
TOTALE	2.4	1 – 10

- a. Range tipico dal livello del mare fino ad alta quota
- b. In funzione della composizione in radionuclidi del suolo e dei materiali da costruzione
- c. In funzione dell'accumulo indoor di radon
- d. In funzione della composizione in radionuclidi di cibi ed acqua potabile

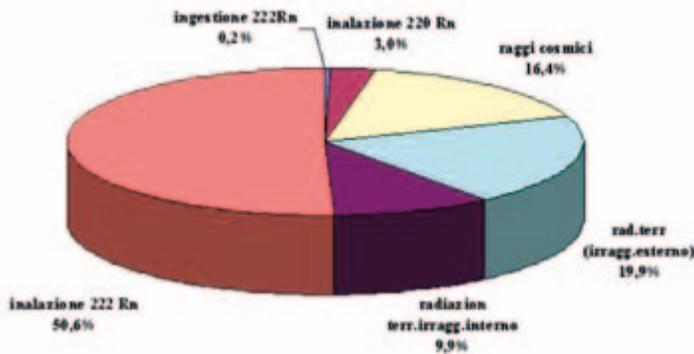


Figura 27 - Dose media dovuta a tutte le sorgenti naturali di radiazioni ionizzanti - Fonte immagine: Internet

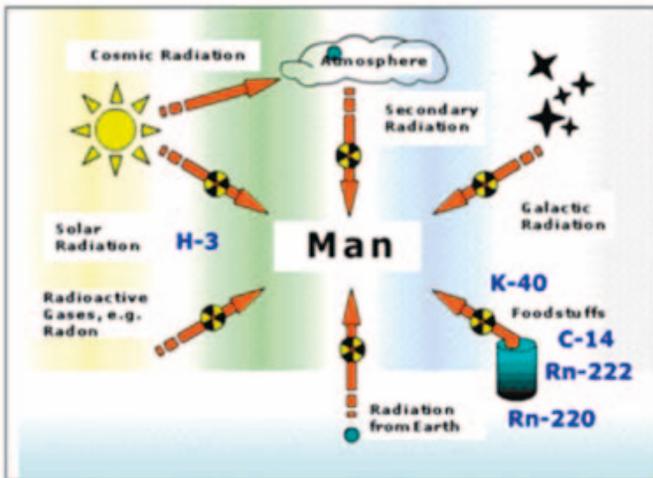


Figura 28 - La radioattività naturale - Fonte immagine: Internet

LA RADIOATTIVITA' ARTIFICIALE

Nel 1919 Rutherford (Nobel per la chimica 1908) scoprì che alcuni isotopi naturali stabili potevano essere trasformati in specie isotopiche instabili per mezzo di reazioni nucleari provocate. Bombardando azoto ordinario gassoso (azoto14) con

particelle alfa, egli realizzò la prima reazione nucleare indotta artificialmente (si veda la Figura 29) e trovò che i nuclei di azoto catturano le particelle alfa ed emettono un protone ad altissima velocità trasformandosi infine nell'isotopo stabile dell'ossigeno di numero di massa 17.

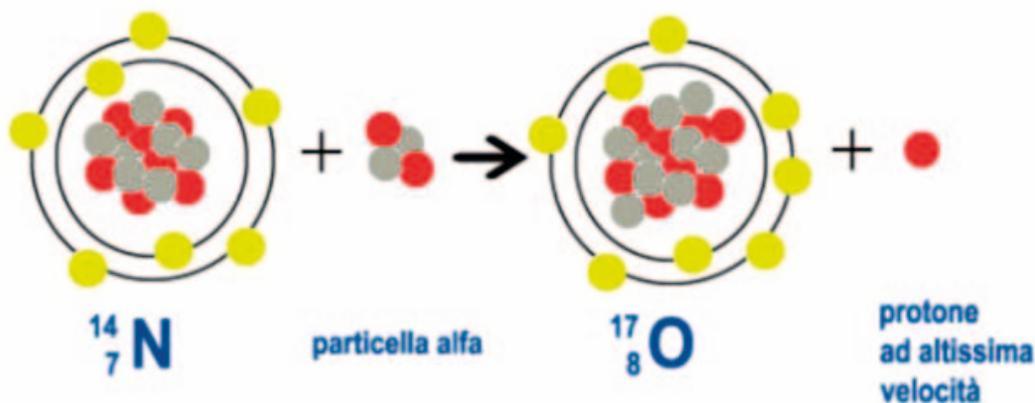


Figura 29 - Reazione nucleare indotta artificialmente - Fonte immagine: Internet



Figura 30 - "Bombardamento" dell'alluminio con particella alfa - Fonte immagine: Internet

Nel 1934 fu dimostrato che alcune reazioni nucleari possono condurre alla formazione di nuclidi radioattivi. Nel gennaio di quell'anno i chimici francesi Irène e Frédéric Joliot-Curie prepararono la prima sostanza radioattiva artificiale bombardando l'alluminio con particelle alfa. L'atomo di alluminio si trasformò in un isotopo del fosforo, che in un intervallo di tempo relativamente breve decade (si veda la Figura 30).

I coniugi Curie scoprirono così la radioattività artificiale, e per questo ricevettero il premio Nobel per la chimica nel 1935. La rilevanza della scoperta stava nella comprensione del fatto che la radioattività non è una caratteristica tipica di certe sostanze ben precise, ma può essere indotta artificialmente in tutti gli elementi (in linea di principio) della tavola periodica.

Poco dopo la scoperta della radioattività artificiale, in marzo, Enrico Fermi compì un importante passo avanti con un'idea semplice: se si usano come proiettili i neutroni, invece delle particelle alfa, si evitano le repulsioni elettromagnetiche, essendo i neutroni privi di carica elettrica, e si può estendere l'induzione della radioattività artificiale anche agli elementi pesanti, cosa che non era riuscita ai francesi. Fermi e i suoi collaboratori, i ragazzi di via Panisperna, si misero, quindi, a bombardare sistematicamente gli elementi della tavola periodica con i neutroni, ma non ottennero radioattività rilevabile. In esta-

te Fermi e i suoi si scontrarono con una serie di difficoltà: giunti all'elemento numero 92, l'uranio. Le proprietà chimiche degli elementi ottenuti non erano riconducibili ad alcun elemento di numero atomico tra 82 e 92 e pertanto la conclusione fu che i prodotti radioattivi dovessero avere numero atomico maggiore di 92. Per questo furono chiamati "transuranici". A Roma si comincia a parlare di Ausonio (Ao) ed Esperio (Hs) come denominazione per gli elementi con $Z = 93$ e $Z = 94$.

Nell'ottobre del 1934 avviene la scoperta: nel tentativo di fare chiarezza su quanto accadeva Fermi interpose (senza apparente motivo), tra la fonte di neutroni e il bersaglio, della paraffina (miscela di idrocarburi solidi ricavata dal petrolio, si presenta come una massa cerosa, biancastra, insolubile in acqua e negli acidi): i risultati furono sorprendenti. La paraffina rallentava i neutroni, dando, quindi, loro più tempo di interagire con i nuclei, ed aumentava l'efficacia nel produrre la radioattività.

L'ipotesi di Fermi verrà confermata ponendo l'apparato in altre sostanze ricche d'idrogeno, come l'acqua. Scoperta la convenienza di rallentare i neutroni facendoli passare o attraverso un blocco di paraffina o entro una vasca d'acqua, il bombardamento più interessante, e inizialmente molto misterioso, si rilevò essere quello dell'uranio.

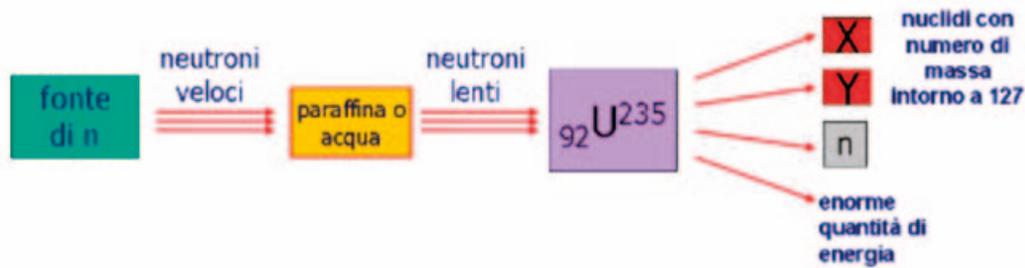


Figura 31 – “Bombardamento” dell’Uranio ad opera dei neutroni - Fonte immagine: Internet

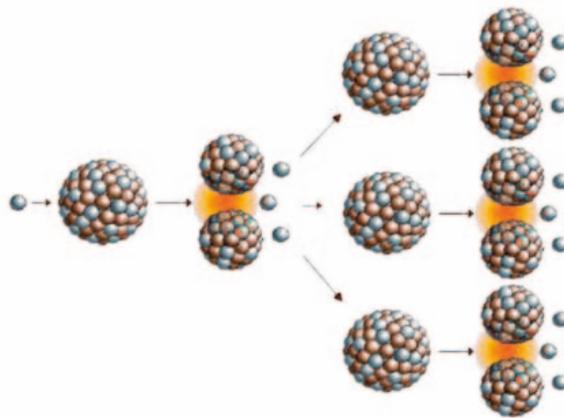


Figura 32 - Reazione di fissione nucleare a catena - Fonte Immagine: Internet

L'uranio 235 si trasformava in nuclidi con numero di massa intorno a 127, un certo numero di neutroni (n) e una enorme quantità di energia (Figura 31).

Nel 1939 i fisici tedeschi O. Hann e F. Strassmann provarono che quando l'uranio veniva bombardato con neutroni si otteneva la formazione di due grossi frammenti nucleari che subivano successivamente una serie di trasformazioni radioattive; tra i prodotti della reazione essi identificarono i nuclei di bario e di cripto.

A questo tipo di reazione nucleare fu dato il nome di fissione nucleare (Figura 32).

La fissione liberava una quantità straordinaria di energia, di gran lunga superiore della semplice radioattività e durante la reazione venivano liberati due o tre neutroni. Quest'ultimo fatto era estremamente importante, poiché ciò rendeva possibile la realizzazione di una reazione nucleare a catena che permetteva la produzione di notevoli quantità di energia.

LA RADIOPROTEZIONE: breve introduzione storica

La radioprotezione nasce all'inizio del secolo scorso quando nei laboratori e negli studi me-

dici si comincia a lavorare con i raggi X e, in seguito, con alcune altre sorgenti di radiazioni ionizzanti. Verso il 1920 sono già noti gli effetti immediati delle alte dosi di radiazioni, mentre vengono approfonditi gli effetti ritardati più difficili da diagnosticare e da collegare alle radiazioni. L'evidenza degli effetti immediati delle radiazioni al di sopra di certe soglie da una parte impone la necessità di proteggere gli operatori e gli sperimentatori intervenendo essenzialmente con schermature e tempi di esposizione e dall'altra porta a definire una dose minima “di tolleranza” al di sotto della quale non vi sono rischi né per i lavoratori né per la popolazione. Tale dose sarà definita con precisione solo verso la fine degli anni 30, e posta pari a 1 “Röntgen” a settimana, ovvero all'incirca 500 millisievert all'anno in unità moderne (si veda nel seguito la sezione dedicata a grandezze e unità di misura). Per avere un'idea dell'entità di tale limite, si pensi che attualmente il limite annuale per la popolazione è di 1 millisievert, cioè 500 volte più basso. Solo negli anni '40 si comincia a notare che le radiazioni ionizzanti sono responsabili anche di effetti genetici e si pensa sia necessario limitare l'esposizione delle gonadi

ovvero le dosi geneticamente significative, che possono indurre mutazioni nella progenie.

Il concetto di rischio anche a basse dosi o, meglio, di rischio senza soglia inferiore ma semplicemente direttamente proporzionale alla dose, si afferma definitivamente nel secondo dopoguerra, quando la sperimentazione avanzata su cavie da laboratorio prima e gli effetti conseguenti alle bombe di Hiroshima e Nagasaki poi, indicano l'esistenza di correlazioni tra dosi non elevate ed effetti tardivi non reversibili.

Nel 1958 l'*International Commission on Radiological Protection* (ICRP) fissa valori di riferimento compatibili con le nuove risultanze e, quindi, molto più bassi dei precedenti. In particolare, si differenzia la massima dose ammissibile annuale per i lavoratori da quella per gli individui della popolazione: la prima è portata a 5 rem (50 millisievert), mentre per la popolazione il limite è dieci volte più basso, pari a 0,5 rem (5 millisievert). Contemporaneamente si fa strada la convinzione che sia necessario ridurre l'esposizione il più possibile o, meglio, quanto ragionevolmente ottenibile compatibilmente con i costi e le necessità. Il principio è sancito nella pubblicazione ICRP del 1965 ed è poi riproposto anche nella pubblicazione n. 26 del 1978, con la frase inglese *As Low As Reasonably Achievable* il cui acronimo, ALARA, è ormai accettato a livello internazionale come sinonimo di ottimizzazione della radioprotezione o di processo di riduzione dell'esposizione.

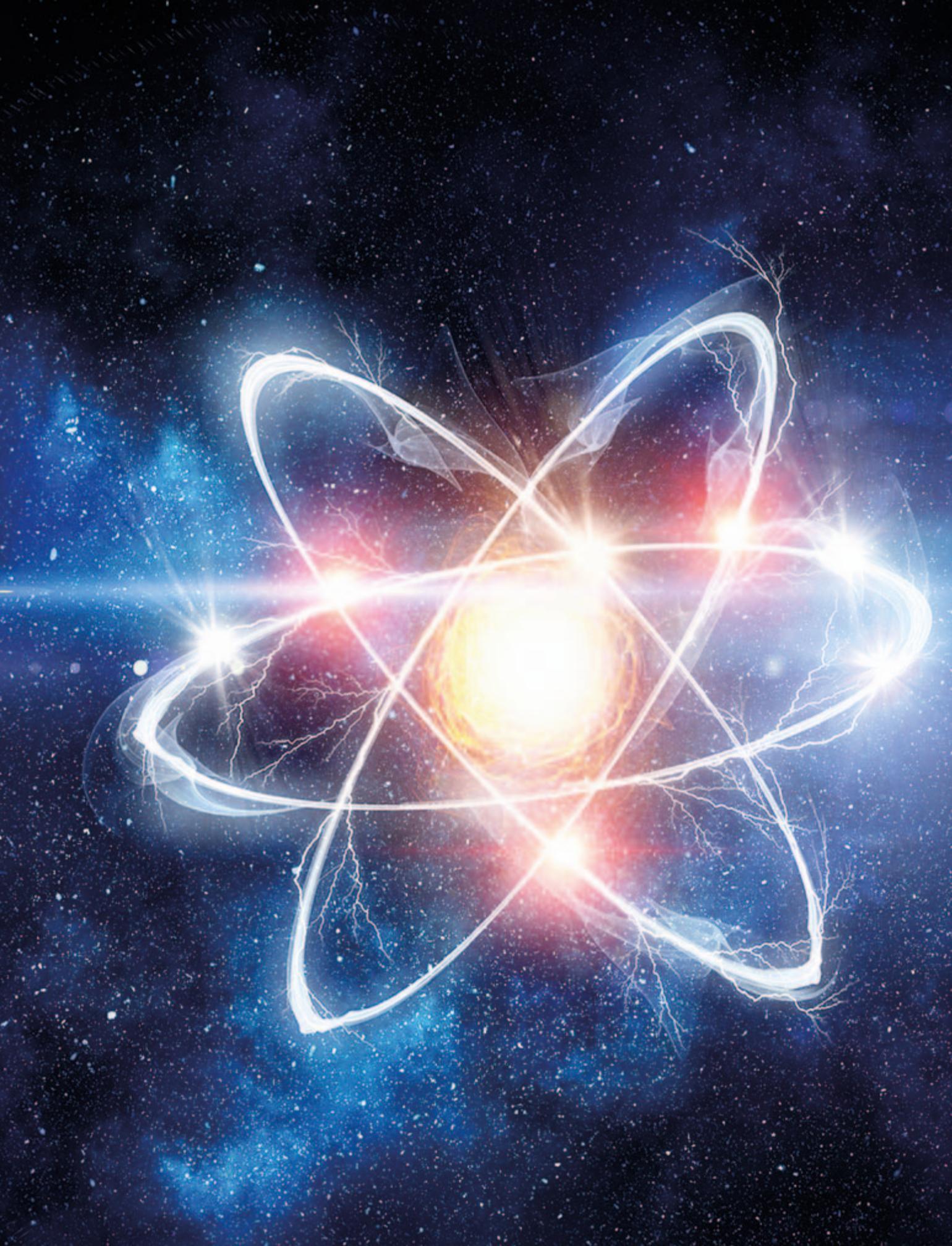
Siamo ormai ai giorni nostri con la più recente raccomandazione dell'ICRP sull'applicazione generale della radioprotezione. Si tratta della pubblicazione n. 60 del 1990, che ribadisce in pratica i principi enunciati nelle pubblicazioni precedenti e riduce ulteriormente i limiti per lavoratori e popolazione portandoli ai valori oggi adottati da tutte le normative dei Paesi più avanzati.

I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE E LA NORMATIVA DI RIFERIMENTO

Il decreto legislativo, n. 101 del 31 luglio 2020 è entrato in vigore il 27/08/2020 e recepisce la direttiva 2013/59/Euratom, la quale stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordina della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117; il decreto stabilisce, in relazione agli obiettivi della direttiva europea, "norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti".

Il decreto stabilisce norme di sicurezza al fine di proteggere le persone dai pericoli derivanti dalle radiazioni ionizzanti, e disciplina: la prote-





zione sanitaria delle persone soggette a qualsiasi tipo di esposizione alle radiazioni ionizzanti, il mantenimento e la promozione del continuo miglioramento della sicurezza nucleare degli impianti nucleari civili; la gestione responsabile e sicura del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi; la sorveglianza e il controllo delle spedizioni di rifiuti radioattivi e di combustibile esaurito e materie radioattive.

LIMITI DI RILEVANZA RADIOLOGICA

Per quanto riguarda il monitoraggio della radioattività ambientale, l'art. 152 del d.lgs. 101/2020 demanda la gestione delle reti uniche regionali alle singole regioni le quali, per l'effettuazione dei prelievi e delle misure, debbono avvalersi delle strutture pubbliche idoneamente attrezzate.

I compiti di controllo su tutti gli aspetti della sicurezza nucleare sono in capo ad ISIN (Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione), autorità di sicurezza nazionale (titolo X del d.lgs. 101/2020). Il monitoraggio radiologico ambientale è uno strumento che consente di valutare lo stato della contaminazione radioattiva dell'ambiente e conseguentemente di stimare la dose efficace alla popolazione, grandezza proporzionale al rischio indotto dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti.

Le misure di concentrazione effettuate sulle varie matrici campionate vengono, pertanto, utilizzate per calcolare la dose agli individui dei gruppi di riferimento della popolazione, tenendo conto delle abitudini alimentari e di vita.

Livelli di riferimento

La normativa di riferimento (D.Lgs. 101/2020) pone dei valori limite sulla dose efficace, data dalla somma delle dosi efficaci ricevute per esposizione esterna e impegnate per inalazione o per ingestione a seguito dell'introduzione di radionuclidi verificatisi nel periodo di riferimento. In conformità ai criteri di base di cui all'allegato I del decreto legislativo 31 luglio 2020 n. 101, una pratica si può considerare priva di rilevanza radiologica quando, in tutte le possibili situazioni realisticamente ipotizzabili, la dose efficace a cui si prevede sia esposta una qualsiasi persona del pubblico, a causa di detta pratica, sia pari o inferiore a 10 μ Sv all'anno. I limiti fissati dalla normativa non sono, però, direttamente confrontabili con i risultati analitici, che forniscono dei valori di concentrazione di attività, dal momento che si tratta di grandezze di natura diversa.

Solo il D. Lgs. 15 febbraio 2016 n. 28 "Attuazione della direttiva 2013/51/EURATOM del Consiglio, del 22 ottobre 2013, che stabilisce i requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano", de-

finisce le caratteristiche radiometriche delle acque potabili. In particolare, il decreto fissa i valori per le concentrazioni di radon e di trizio nelle acque potabili in 100 Bq/l ed il valore della dose indicativa in 0,10 mSv per anno solare, equivalenti a 100 μ Sv per anno solare. Inoltre, riporta i valori di concentrazioni di attività derivate per i principali radionuclidi di origine naturale ed artificiale e stabilisce che il calcolo della dose indicativa può essere effettuato attraverso le due strategie:

1. Strategia di screening basata sulla misura dell'attività alfa totale e beta totale.
2. Strategia di screening basata sull'analisi della concentrazione dei singoli nuclidi.

LIMITI DI DOSE DEI LAVORATORI E DELLA POPOLAZIONE (Art 146-D.lgs. 101/2020)

I limiti di dose per i lavoratori esposti sono stabiliti in:

- a) 20 mSv dose efficace in un anno solare;
- b) fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), sono stabiliti i seguenti limiti di dose equivalente in un anno solare:
 1. 20 mSv per il cristallino;
 2. 500 mSv per la pelle; tale limite si applica alla dose media, su qualsiasi superficie di 1 cm², indipendentemente dalla superficie esposta;
 3. 500 mSv per le estremità.

I limiti di dose per gli apprendisti e per gli studenti di cui all'articolo 120, comma 1, sono stabiliti, in relazione alla suddivisione dei medesimi in ragione dell'età e del tipo di attività lavorativa o di studio, nel modo seguente:

- a) per gli apprendisti e studenti di cui all'articolo 120, comma 1, lettera a) i limiti di dose efficace e di dose equivalente per particolari organi o tessuti, sono uguali ai limiti fissati per i lavoratori esposti di cui al comma 1;
- b) per gli apprendisti e studenti di cui all'articolo 120, comma 1, lettera b), i limiti di esposizione sono stabiliti in:
 1. 6 mSv di dose efficace per anno solare;
 2. fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), sono stabiliti i seguenti limiti di dose equivalente in un anno solare:
 - 2.1. 15 mSv per il cristallino;
 - 2.2. 150 mSv per la pelle; tale limite si applica alla dose media, su qualsiasi superficie di 1 cm² indipendentemente dalla superficie esposta;

- 2.3. 150 mSv per le estremità; c) per gli apprendisti e gli studenti di cui all'articolo 120, comma 1, lettere c) e d) i limiti annuali di dose efficace nonché di dose equivalente per particolari organi o tessuti sono uguali alla metà di quelli stabiliti al comma 7, per gli individui della popolazione; per detti soggetti, inoltre, la dose ricevuta per ogni singola esposizione correlata alla loro attività non può superare un ventesimo dei limiti annuali di cui allo stesso comma 7.

Qualora per i lavoratori esposti e per gli apprendisti e gli studenti ad essi equiparati ai sensi del comma 2, lettera a), sia superato, anche a seguito di esposizioni accidentali, di emergenza o esposizioni soggette ad autorizzazione speciale di cui al paragrafo 5 dell'Allegato XXII stesso, il limite annuale di dose efficace di 20 mSv di cui al comma 1, le successive esposizioni devono essere limitate, per anno solare, a 10 mSv sino a quando la media annuale delle esposizioni stesse per tutti gli anni seguenti, compreso l'anno del superamento, risulti non superiore a 20 mSv. L'obbligo della sorveglianza sanitaria eccezionale previsto dall'articolo 141 sussiste per i lavoratori esposti, gli apprendisti e gli studenti che, nel corso delle loro attività lavorative o di studio, abbiano ricevuto, in un anno solare:

- a) una dose superiore al limite di 20 mSv fissato al comma 1, lettera a) per la dose efficace, determinata in base alle indicazioni di cui al comma 3, oppure
- b) una dose maggiore di uno dei limiti fissati nel comma 1, lettera b) per particolari organi o tessuti.

L'obbligo di comunicazione di cui all'articolo 142 sussiste ove si sia verificata anche una delle condizioni di cui al comma 4.

I limiti di dose per i lavoratori che, in relazione alle proprie occupazioni, sono considerati, ai sensi dell'articolo 133, comma 2, lavoratori non esposti, nonché per i lavoratori autonomi e dipendenti da terzi, di cui all'articolo 117, sono, con riferimento all'attività lavorativa di tali soggetti, pari ai corrispondenti limiti fissati nel comma 7, per gli individui della popolazione.

I limiti di esposizione per gli individui della popolazione sono stabiliti in:

- a) 1 mSv di dose efficace per anno solare;
- b) fermo restando il rispetto del limite di dose efficace di cui alla lettera a), sono stabili-

ti i seguenti limiti di dose equivalente in un anno solare:

1. 15 mSv per il cristallino;
2. 50 mSv per la pelle, calcolato in media su 1 cm² di pelle, indipendentemente dalla superficie esposta.

PRINCIPIO ALARA

Il Principio ALARA (*As Low As Reasonably Achievable*) stabilisce che la radiazione a cui è esposta la popolazione, se giustificata, sia mantenuta ad un livello il più basso possibile, ovvero il livello più basso ragionevolmente raggiungibile riconosciuto a livello internazionale. In base al principio di ottimizzazione, se un'attività implica l'esposizione giustificata a radiazioni, è assolutamente prioritario evitare ogni esposizione e contaminazione non necessaria.

I PRINCIPI DELLA RADIOPROTEZIONE

Il sistema di radioprotezione si basa sui principi di **giustificazione**, **ottimizzazione** e **limitazione delle dosi** (Dgls 101/2020-Art. 1, comma 3, a,b,c). La filosofia di limitazione delle dosi proposta dall'ICRP si basa su due esigenze:

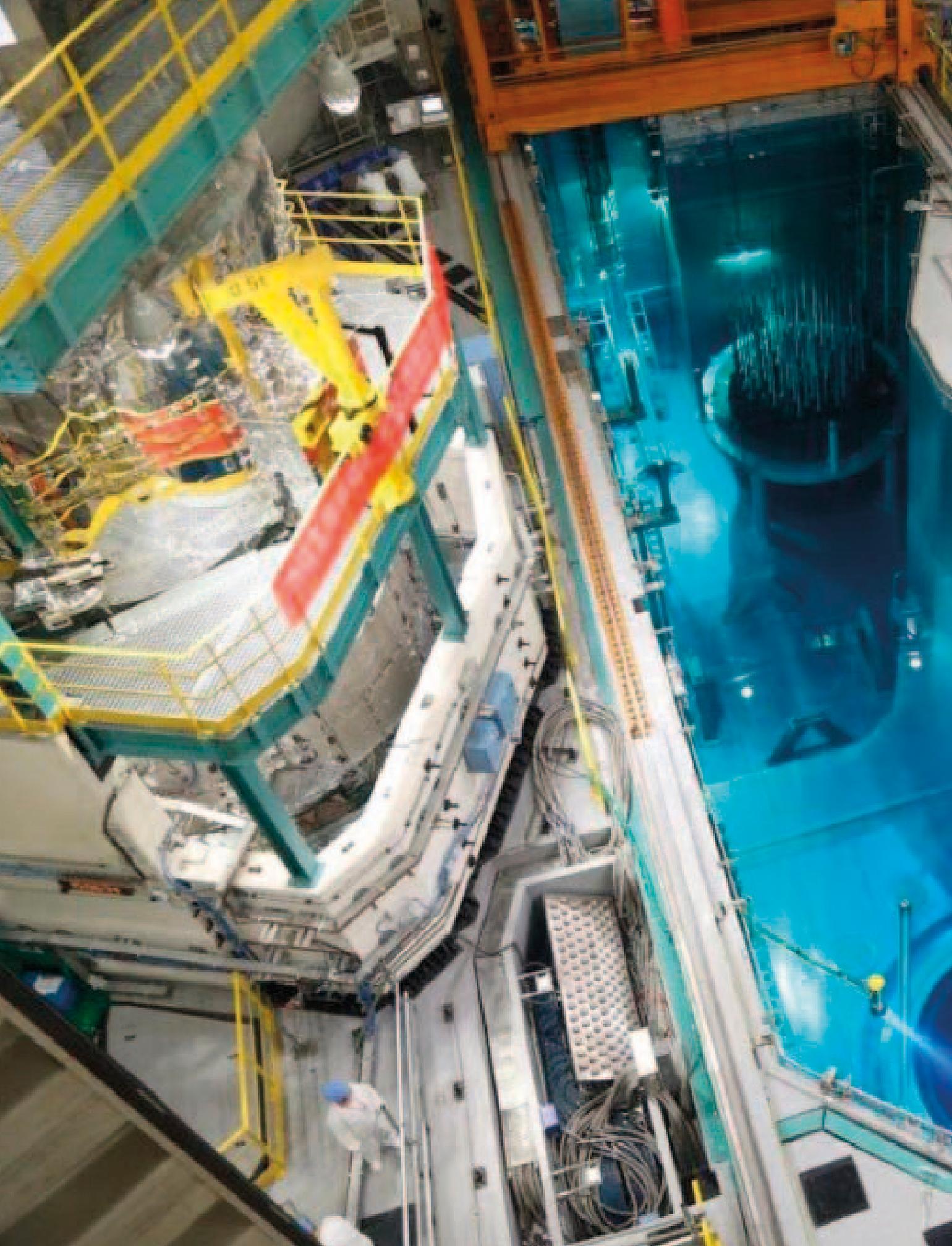
- la prevenzione degli effetti deterministici;
- la limitazione della probabilità di effetti probabilistici entro valori considerati accettabili.

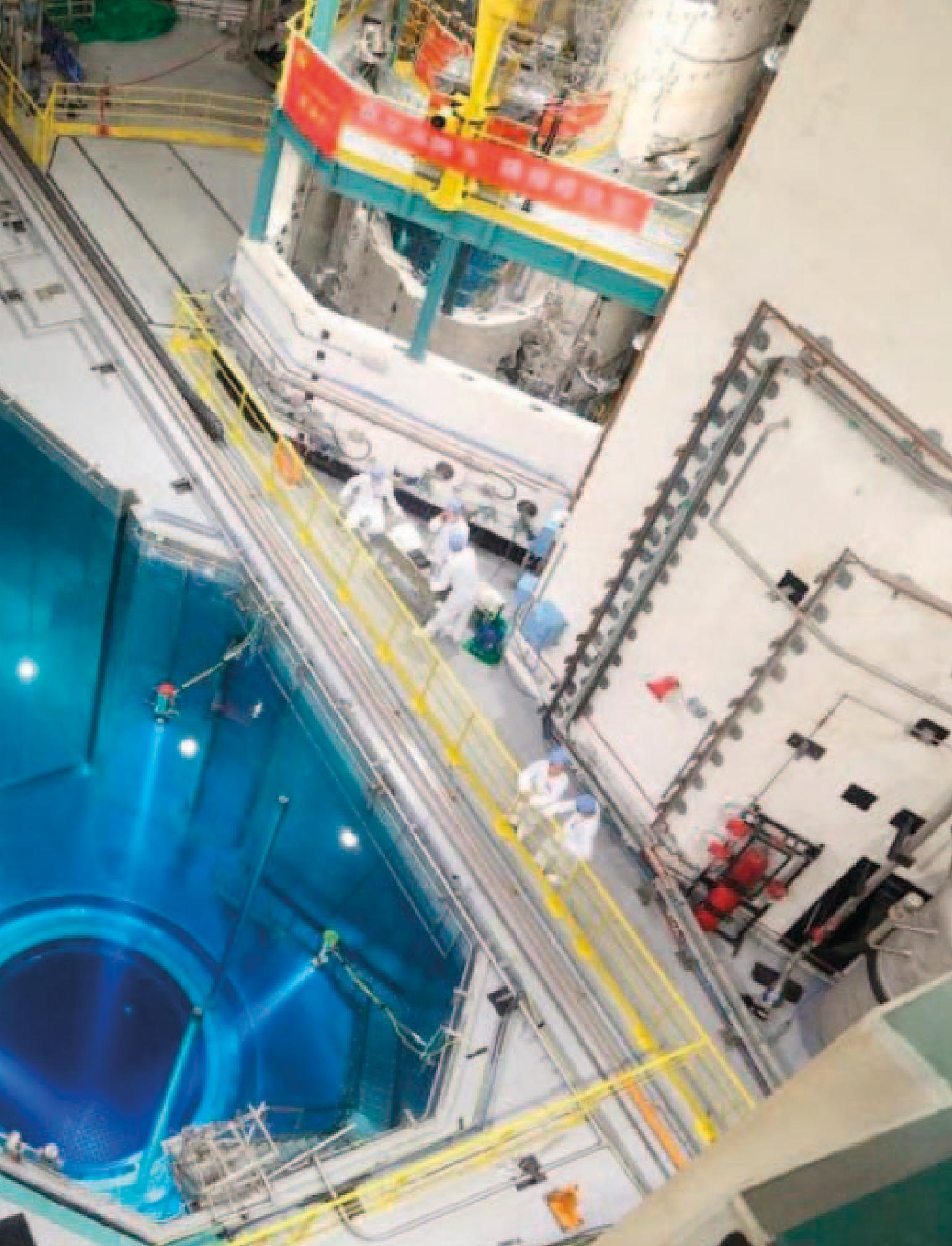
Principio di Giustificazione:

Gli atti giuridici che consentono lo svolgimento di una pratica garantiscono che il beneficio per i singoli individui o per la collettività sia prevalente rispetto al detrimento sanitario che essa potrebbe causare. Le determinazioni che introducono o modificano una via di esposizione e le determinazioni per le situazioni di esposizione esistenti e di emergenza devono apportare più benefici che svantaggi, in altre parole si considerano giustificate le sole attività che comportino un beneficio netto e dimostrabile per la società o per gli individui esposti.

Principio di Ottimizzazione:

La radioprotezione di individui soggetti a esposizione professionale e del pubblico è ottimizzata allo scopo di mantenere al minimo ragionevolmente ottenibile le dosi individuali, la probabilità dell'esposizione e il numero di individui esposti, tenendo conto dello stato delle conoscenze tecniche e dei fattori economici e sociali. L'ottimizzazione della protezione di individui soggetti a esposizione medica è riferita all'entità delle singole dosi, compatibilmente con il fine medico dell'esposizione. Questo principio si applica





non solo in termini di dose efficace ma, ove appropriato, anche in termini di dose equivalente, come misura precauzionale destinata a mantenere le incertezze relative al detrimento sanitario al di sotto della soglia per le reazioni tissutali.

Principio di Limitazione:

Nelle situazioni di esposizione pianificata, la somma delle dosi cui è esposto un individuo non può superare i limiti fissati per l'esposizione professionale o del pubblico. Le esposizioni mediche non sono soggette a limitazioni delle dosi (Art. 1, comma 3, a,b,c).

LE RADIAZIONI IONIZZANTI

Le radiazioni ionizzanti sono una forma di energia avente le seguenti caratteristiche:

- è emessa da una sorgente (naturale o artificiale);
- si propaga nello spazio (con o senza materia);
- ha la capacità di produrre ionizzazione nel mezzo in cui si propaga a seguito di processi in cui sono liberati elettroni dagli atomi con cui la radiazione ha interagito.

Le radiazioni ionizzanti possono essere costituite da particelle cariche (elettroni, protoni ecc.) o neutre (come i fotoni e i neutroni).

La ionizzazione in un mezzo esposto a radiazioni ionizzanti è prodotta essenzialmente dalle particelle cariche che in esso si propagano. Le particelle neutre possono iniziare processi (dipendenti dal tipo di particelle e di interazione) a seguito dei quali si liberano particelle cariche che producono, poi, la ionizzazione nel mezzo. L'energia minima affinché le particelle neutre possano indurre i processi iniziali cui consegue la ionizzazione, dipende dal mezzo e dal tipo di radiazione. L'energia minima che le particelle cariche – incidenti su un mezzo o in esso liberate da particelle non cariche – devono avere per produrre ionizzazione, varia a seconda degli elementi di cui è costituito il mezzo. Inoltre, per un dato elemento, questa energia è diversa a seconda che l'interazione avvenga con un atomo isolato o con un materiale solido costituito da quell'elemento o da un suo composto. Quando le radiazioni ionizzanti incidono su un mezzo, possono trasferire ad esso energia in misura e con modalità che dipendono dalle caratteristiche delle radiazioni e del mezzo considerati.

I PRINCIPALI TIPI DI RADIAZIONI IONIZZANTI

Nel seguito sono indicate le caratteristiche fondamentali dei principali tipi di radiazioni ionizzanti.

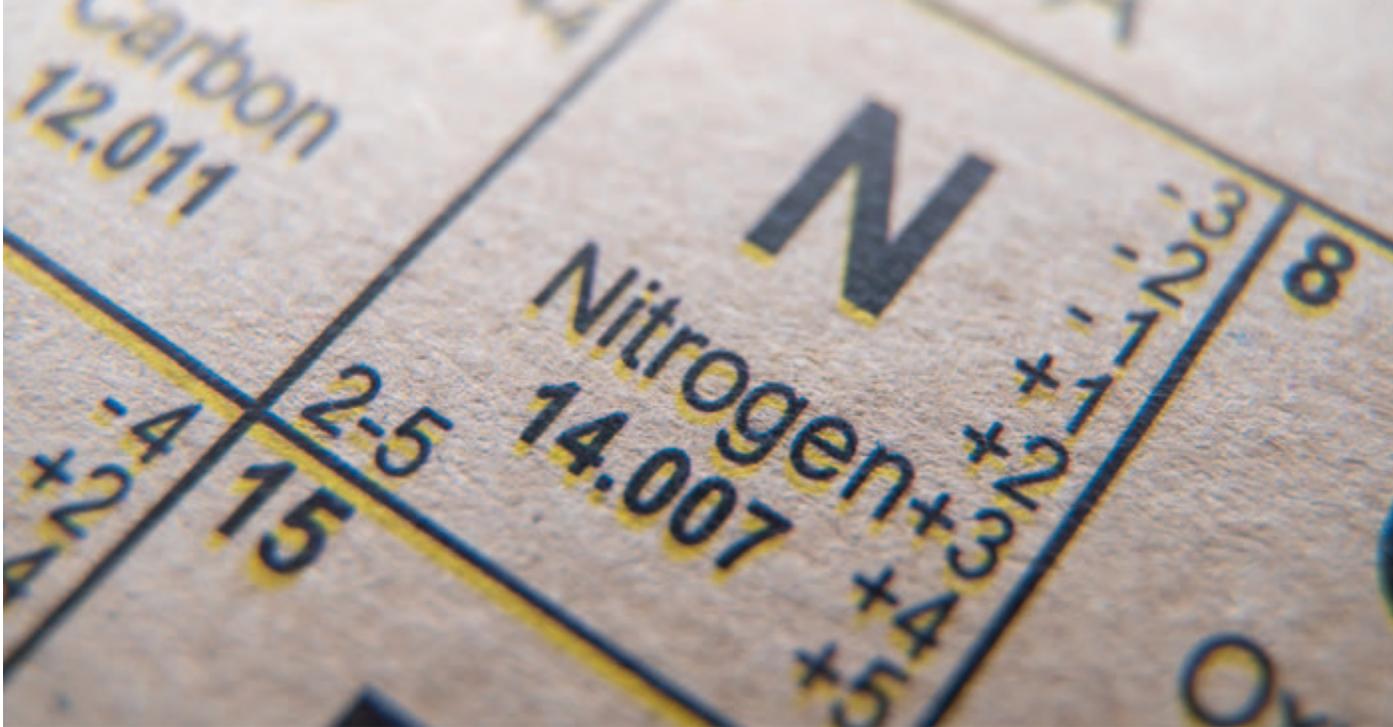
Particelle alfa: sono nuclei di elio con carica pari a $2e+$ e massa pari a 4 u.m.a., composte

da due neutroni e due protoni. Sono prodotte nel decadimento di molti radionuclidi naturali e sono caratterizzate da una ionizzazione specifica estremamente elevata, da traiettorie praticamente rettilinee e percorsi massimi notevolmente brevi (pochi cm in aria, pochi micron nel tessuto vivente). Non danno luogo ad alcun rischio di esposizione esterna, ma solo interna nel caso di incorporazione di radionuclidi-emettitori.

Particelle beta: sono assimilabili ad elettroni prodotti nel decadimento di gran parte dei radionuclidi naturali o artificiali. Hanno la stessa natura e le stesse caratteristiche di elettroni della stessa energia prodotti da altri fenomeni, per esempio per emissione da un catodo ed accelerazione tramite campi elettrici. Sono soggette a interazioni elettrostatiche dello stesso tipo di quelle subite dalle particelle alfa, ma a causa della massa molto più bassa evidenziano caratteristiche completamente diverse: la ionizzazione specifica è drasticamente inferiore, le traiettorie sono notevolmente tortuose, con percorsi massimi molto più lunghi di quelli delle alfa a parità di energia. Possono di norma dar luogo ad esposizione esterna, soprattutto della cute e del cristallino, oltre che, naturalmente, ad esposizione interna nel caso di incorporazione di radionuclidi-emittenti. Un'altra differenza sostanziale, rispetto al caso delle particelle, è la capacità di produrre una radiazione elettromagnetica secondaria, i ben noti raggi X. In pratica quando incidono su un qualsiasi materiale, gli elettroni possono subire una brusca deviazione passando nel campo coulombiano di un nucleo del mezzo ed emettere una frazione anche consistente della loro energia sotto forma di radiazione elettromagnetica. I raggi X così prodotti sono detti anche radiazione di frenamento o di *bremsstrahlung*. Essi sono molto più penetranti degli elettroni primari e possono dar luogo a significativi problemi di esposizione esterna.

Neutroni: sono privi di carica elettrica per cui esplicano i loro effetti solo per via indiretta, tramite le particelle cariche prodotte nelle collisioni con i nuclei atomici; sia per l'irradiazione dei tessuti che per l'assorbimento dei neutroni è particolarmente importante il ruolo dei protoni di rinculo prodotti da *scattering* elastico su nuclei di idrogeno. Essendo le interazioni responsabili del rallentamento dei neutroni relativamente rare, questo tipo di radiazione è caratterizzato da notevole capacità di penetrazione nella materia.

Raggi gamma: sono radiazioni elettromagnetiche (fasci di fotoni energetici) capaci di produrre ionizzazione fisicamente indistinguibili dai raggi X prodotti artificialmente per collisione di fasci di elettroni contro una sostanza ad alto numero atomico. Essi si producono nella transizione di un nucleo da uno stato eccitato a un altro generalmente stabile, principalmente a seguito di un



decadimento alfa o beta. I raggi gamma, come del resto i raggi X, producono ionizzazione in modo indiretto, cioè come già visto per mezzo di particelle cariche messe in moto nella materia irradiata, in questo caso principalmente gli elettroni secondari prodotti in interazioni di tipo fotoelettrico, Compton e creazione di coppie.

SITUAZIONI DI ESPOSIZIONE

Le disposizioni del decreto 101/2020 fissano i requisiti e i regimi di controllo relativi alle diverse situazioni di esposizione e forniscono le seguenti definizioni.

Situazione di esposizione pianificata: “una situazione di esposizione che si verifica per l'uso pianificato di una sorgente di radiazioni o risulta da un'attività umana che modifica le vie d'esposizione in modo da causare un'esposizione o un'esposizione potenziale della popolazione o dell'ambiente. Le situazioni di esposizione pianificata possono includere le esposizioni normali o quelle potenziali”.

Esposizione normale: “l'esposizione che si prevede si verifichi nelle condizioni di funzionamento normali di un'installazione o di un'attività (tra cui la manutenzione, l'ispezione, la disattivazione), compresi gli eventi anomali di scarso rilievo che possono essere tenuti sotto controllo, vale a dire nel corso del normale funzionamento degli eventi operativi previsti”.

Esposizione potenziale: “un'esposizione che, pur non essendo certa, può verificarsi in conseguenza di un evento o di una sequenza di eventi di natura probabilistica, tra cui guasti delle apparecchiature o errore operativo”.

GRANDEZZE RADIOPROTEZIONISTICHE

«**Dose assorbita**» (**D**): energia assorbita per unità di massa e cioè il quoziente di dE diviso

per dm, in cui dE è l'energia media nell'elemento volumetrico di massa dm; ai fini del presente decreto, la dose assorbita indica la dose media in un tessuto o in un organo. L'unità di dose assorbita è il gray.

«**Dose efficace**» (**E**): è la somma delle dosi equivalenti pesate in tutti i tessuti e organi del corpo causate da esposizione interna ed esterna. È definita dalla seguente formula:

$$E = \sum_T w_T H_T = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R}$$

dove: $D_{T,R}$ è la dose assorbita media, nel tessuto o organo T, dovuta alla radiazione R, w_R è il fattore di peso per la radiazione e w_T è il fattore di peso per il tessuto o l'organo T. I valori relativi a w_T e w_R sono indicati nell'allegato XXIV. L'unità di dose efficace è il sievert (Sv).

«**Dose equivalente**» (**H_T**): la dose assorbita, nel tessuto o organo T, pesata in base al tipo e alla qualità della radiazione R; È definita dalla seguente formula:

$$H_{T,R} = w_R D_{T,R}$$

dove: $D_{T,R}$ è la dose assorbita media, nel tessuto o organo T dovuta alla radiazione R e w_R è il fattore di peso per la radiazione. Quando il campo di radiazioni è composto di tipi ed energie con valori diversi di w_R , la dose equivalente totale, H_T , è espressa da:

$$H_T = \sum_R w_R D_{T,R}$$

I valori relativi a w_R sono indicati nell'allegato XXIV. L'unità di dose equivalente è il sievert (Sv).



Note

1. Proiezione delle Nazioni Unite – Pubblicazione ONU WPP2022 Revision of World Population Prospects.
2. La popolazione mondiale nel novembre 2022 ha raggiunto la ragguardevole cifra di 8 miliardi di persone, valore che tenderà a crescere richiedendo sempre più energia disponibile.
3. Qualsiasi altra sostanza potenzialmente inquinante che si origina lungo tutta la catena di approvvigionamento dell'energia, dal reperimento delle materie prime al momento in cui l'energia (in qualsiasi forma) giunge all'utente finale.
4. La valutazione dell'energia primaria è basata sulla quantità di energia fossile in ingresso capace di generare quel valore di elettricità in un impianto termico standard. Per esempio, se la produzione elettrica da nucleare di un determinato Paese fosse 100 TWh e l'efficienza di un impianto termico standard fosse 38%, l'energia primaria in ingresso sarebbe $100/0,38 = 263$ TWh equivalenti a circa 0,95 EJ.
5. IEA (International Energy Agency, Parigi) è un'organizzazione internazionale intergovernativa fondata nel 1974 dall'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OCSE) in seguito allo shock petrolifero dell'anno precedente. (Wiki) Lo scopo dell'agenzia è quello di facilitare il coordinamento delle politiche energetiche dei paesi membri per assicurare la stabilità degli approvvigionamenti energetici (principalmente petrolio) al fine di sostenere la crescita economica. L'Agenzia ha esteso il suo mandato verso la direzione dello sviluppo sostenibile (Wiki).
6. STEPS - Stated Policies Scenario. Tale scenario non dà per scontato che i governi raggiungano i traguardi annunciati, esplora dove i sistemi energetici possano tendere senza implementazioni aggiuntive di politica energetica. (Def IEA)
7. Una Gt equivale ad un miliardo di tonnellate.
8. APS - Announced Pledges Scenario. Lo scenario degli impegni annunciati introdotto nel 2021 mira a mostrare fino a che punto le ambizioni e gli obiettivi annunciati, compresi quelli più recenti, possano raggiungere la riduzione delle emissioni per arrivare a zero entro il 2050.
9. 1 GW = 1.000.000.000 W.
10. 1 TWh = 1000 miliardi di Wh.
11. <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-%20statistiche>
12. <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-%20statistiche>
13. <http://www.comitatoscientifico.org/temi%20CG/energia/Rinnovabili.htm>

14. <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-%20statistiche>
15. 1 MWh (megawattora) = 1.000.000 Wh (wattora).
16. Agenzia internazionale per l'energia atomica, International Atomic Energy Agency (IAEA).
17. Fu proprio l'interruzione di una delle linee elettriche che collegano l'Italia e la Svizzera, attraverso cui viene, tuttora, importata l'energia elettrica, a causare nel 2003 il collasso della rete nazionale ed il conseguente blackout che coinvolse l'intero Paese.
18. In fase di dimensionamento di un impianto fotovoltaico, in via esemplificativa, è opportuno considerare alcune caratteristiche che influenzano la quantità di energia captata e prodotta e il rendimento dell'impianto che esprime il rapporto tra la quantità prodotta e quella massima producibile. I principali fattori che influiscono sul rendimento dell'impianto sono: caratteristiche intrinseche dei pannelli; inclinazione dei pannelli; esposizione dei pannelli; ombreggiamento; distanza tra le file; perdite energetiche (Fonte: <https://biblus.acca.it/focus/rendimento-dei-pannelli-fotovoltaici-i-fattori-da-valutare/>). Per quanto concerne la produzione di energia elettrica da un impianto eolico, in via esemplificativa, è opportuno tener conto della variabilità e della aleatorietà del vento. La forza del vento, infatti, muta su una scala di giorni, di ore o minuti, a seconda delle condizioni meteorologiche e la direzione e l'intensità del vento variano, in maniera repentina, intorno al valore medio. Tale variazione prende il nome di turbolenza che è definita, su qualunque intervallo di tempo, come il rapporto tra la deviazione standard della velocità del vento e la velocità media stessa (Fonte: Quaderni di applicazione tecnica N.13 Impianti eolici - ABB).
19. Metodo Monte Carlo: la simulazione Monte Carlo è una tecnica matematica che riesce a prevedere i possibili esiti di un evento incerto. Questo metodo viene utilizzato per analizzare i dati passati e prevedere una serie di risultati futuri in base a una scelta di azioni. La simulazione del metodo Monte Carlo è un modello probabilistico che nella sua previsione può includere un elemento di incertezza o di casualità.
20. Ad eccezione dell'esigua quantità di materiali attivati o contaminati da condizionare e smaltire presso il Deposito Nazionale dei rifiuti radioattivi.
21. Il Regno Unito è stato per decenni leader nella progettazione e commercializzazione dei reattori moderati a grafite e refrigerati a gas, sia di prima che di seconda generazione (AGR, tuttora in servizio), mentre la Germania ha realizzato, tra gli altri, il reattore KONVOI (nelle sue varie versioni) che, non solo per decenni ha rappresentato il più potente reattore commerciale in esercizio con una potenza netta di 1450 MWe (Neckarwestheim 2) ma è servito, insieme al reattore N4 della francese Framatome (Francia), da base di sviluppo dell'attuale EPR (ex AREVA/nuova Framatome).
22. Attualmente in costruzione presso il sito di Lima, distretto di Zarate, nella provincia di Buenos Aires; la prima criticità è prevista nel 2023.
23. Si tratta del primo e unico SMR ad essere approvato (design approval) dalla NRC negli USA. Il design del NuScale Power Module si basa sulla collaudata tecnologia ad acqua pressurizzata ed è stato sviluppato per fornire energia per la generazione elettrica, il teleriscaldamento, la desalinizzazione, la produzione di idrogeno su scala commerciale e altre applicazioni per le quali è richiesta la fornitura di calore di processo.
24. Diverse unità raggruppabili in un unico sito, utilizzabili insieme o a gruppi, in funzione della domanda.
25. Il costo, ove possibile, è stato convertito da \$ in € ed aggiornato al 2021-2022.
26. L'ENEC è l'entità responsabile della costruzione e della proprietà degli impianti di energia nucleare negli Emirati Arabi Uniti.
27. Bloomberg stimò, inizialmente, il valore dell'accordo in 30 miliardi di dollari, un suo successivo report corresse tale valore nella stima corrente.
28. È importante sottolineare che, dal punto di vista fisico e strutturale, nelle centrali nucleari moderne della seconda generazione (in poi) l'isotopo dell'uranio 235U è presente solo al 3,5% mentre, in una bomba atomica, deve essere presente almeno al 95%.
29. Tipicamente, con la maturazione delle tecnologie raggiunta oggi, una centrale nucleare può, mediante la sostituzione periodica e pianificata di componenti critici, rimanere attiva anche oltre gli 80 anni.
30. I sistemi SCADA sono sistemi informatici distribuiti di complessità variabile utilizzati per monitorare e supervisionare (anche da remoto) i dispositivi fisici che fanno parte di un generico impianto, anche nucleare.
31. L'Agenzia internazionale per l'energia atomica (AIEA) è il forum intergovernativo centrale per la cooperazione tecnica e scientifica nel settore nucleare a livello mondiale. È la depositaria di varie convenzioni internazionali cruciali, quali la Convenzione sulla sicurezza nucleare, la Convenzione sulla notifica tempestiva di un incidente nucleare e la Convenzione sull'assistenza in caso di incidenti nucleari o di emergenza radiologica. Le norme di sicurezza dell'AIEA stabiliscono i principi fondamentali, i requisiti e le raccomandazioni per assicurare la sicurezza nucleare e fungono da punto di riferimento a livello mondiale.
32. L'Euratom, in virtù dell'omonimo trattato che lo ha istituito, è un'entità giuridica distinta che ha il potere di stabilire e far rispettare le norme di sicurezza per la protezione sanitaria dei lavoratori e della popolazione.
33. Recentemente, con la "tassonomia", la UE ha mostrato l'intenzionalità favorevole ad una "apertura" all'uso dell'energia nucleare.

Bibliografia

- Bartela Ł., Gładysz P., Ochmann J., Qvist S., Sancho L.M., Repowering a Coal Power Unit with Small Modular Reactors and Thermal Energy Storage. *Energies* 2022, 15, 5830.
- Centro Studi Confindustria (CSC). Gas: rincari e scarsità mettono in ginocchio l'Europa. Fontana A., Rapacciuolo C., Buccellato T., Di Colli S., Felici S., Labartino G., Pensa C., Pignatti M., Puccioni C.. [Online]. Disponibile www.confindustria.it.
- CONFINDUSTRIA - Prezzo del gas record, inflazione e tassi più su: contesto difficile nella seconda metà del 2022
- Cumo M. et al., Nuclear Energy in the World, 3rd Conference on the Future of Science, Venice, September. 19 - 22 2007.
- Cumo M., Impianti Nucleari, UTET, 1976
- Di Pietro A., Aspetti ingegneristici della fissione nucleare - Convegno "La Ricerca di frontiera per l'energia nucleare sostenibile - Le tecnologie più innovative per la produzione di energia decarbonizzata" del 9 febbraio 2021 – Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- Di Pietro A., I reattori SMR refrigerati ad acqua - Aspetti della sicurezza nella tecnologia nucleare di nuova generazione. – Convegno "Il ruolo dell'Ingegneria Nucleare nella Transizione Ecologica" del 21 gennaio 2022 - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- Di Pietro A., L'opzione nucleare in un mix energetico razionale per una maggiore autonomia nazionale. Convegno "L'Opzione Nucleare dalla Transizione Ecologica all'Emergenza Energetica" del 26 maggio 2022 – Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- El-Wakil M. M., Nuclear Power Engineering, McGraw-Hill, 1962
- ETHERINGTON H., "Nuclear Engineering Handbook", Mc Graw Hill Co., New York, 1958.
- FAW R, e SHULTIS J.K., Fundamentals of Nuclear Science and Engineering, CRC Press 2007.
- Lamarsh J.R., Introduction to Nuclear Engineering, Addison-Wesley, 1976
- Licensing & Permitting Task Force of the World Nuclear Association, Licensing and Project Development of New Nuclear Plants, WNA-World Nuclear Association August 2015, Report No. 2015/005
- Lombardi C., Impianti nucleari, CLUP, 2003
- MINISTERO DELLA TRANSIZIONE ECOLOGICA - LA SITUAZIONE ENERGETICA NAZIONALE NEL 2020-2021
- MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO - LA SITUAZIONE ENERGETICA NAZIONALE NEL 2018-2019
- Montagnini B., Lezioni di fisica del reattore, Università di Pisa, 1980.
- Murray R., Nuclear energy, Butterworth-Heinemann, 2014.
- Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma. "Tecnologie nucleari innovative: i reattori SMR prospettive di utilizzo", Quaderno - N. 1 del 2019, Roma
- Panella B., Reattori Nucleari ad Acqua Leggera – Termoidraulica del Nocciolo. Grafica Nuova, Torino, 1981.
- Sepielli M., L'Ingegneria nucleare come opzione necessaria nella transizione ecologica - Affidabilità e convenienza degli impianti di nuova generazione. Convegno "Il ruolo dell'Ingegneria Nucleare nella Transizione Ecologica" del 21 gennaio 2022 - Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- Sepielli M., L'opzione nucleare in una proposta di un piano energetico diversificato tecnologicamente e geograficamente. Convegno "L'Opzione Nucleare dalla Transizione Ecologica all'Emergenza Energetica" del 26 maggio 2022 – Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- Sepielli M., Panoramica internazionale sulle applicazioni nucleari innovative e sostenibili per la produzione di energia termo-elettrica in ambito internazionale. Convegno "La Ricerca di frontiera per l'energia nucleare sostenibile - Le tecnologie più innovative per la produzione di energia decarbonizzata" del 9 febbraio 2021 – Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
- TERNA S.P.A. e GRUPPO TERNA – Rapporto Adeguatezza Italia – 2019
- Tong L.S., Weisman J., Thermal analysis of pressurized water reactor, ANS, 1979



Sitografia

- http://arpg-serv.ing2.uniroma1.it/patera/didattica/FisRadMed/pdf/12_cariche.pdf
- <http://euanmearns.com/the-bn-800-fast-reactor-a-milestone-on-a-long-road/>
- https://en.cnn.com.cn/2021-11/16/c_681939.htm
- <https://op.europa.eu/webpub/eca/special-reports/nuclear-safety-3-2020/it/>
- <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- <https://www.argentina.gob.ar/cnea/carem>
- <https://www.arpat.toscana.it/temi-ambientali/radioattivita/radon/cosa-e-il-radon/storia-del-radon>
- <https://www.bag.admin.ch/bag/it/home/gesund-leben/umwelt-und-gesundheit/strahlung-radioaktivita-et-schall/strahlung-gesundheit/grundprinzipien-im-strahlenschutz.html>
- <https://www.certifico.com/sicurezza-lavoro/documenti-sicurezza/67-documenti-riservati-sicurezza/11362-classificazione-lavoratori-e-ambienti-di-lavoro-radiazioni-ionizzanti>
- <https://www.depositonazionale.it/rifiuti-radioattivi/pagine/la-radioattivita.aspx>
- <https://www.dtt-project.it/>
- <https://www.epicentro.iss.it/radon/>
- <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/it/sheet/62/energia-nucleare>
- <https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2020/08/12/201/so/29/sg/pdf>
- <https://www.iaea.org/newscenter/news/repurposing-fossil-fuel-power-plant-sites-with-smrs-to-ease-clean-energy-transition>
- <https://www.iter.org/>
- <https://www.lngs.infn.it/it/radioattivita>
- <https://www.nuscalepower.com/en/products/voygr-smr-plants>
- <https://www.protezionecivile.gov.it/it/normativa/decreto-legislativo-n101-del-31-luglio-2020-0>
- <https://www.puntosicuro.it/rischi-fisici-C-36/radiazioni-ionizzanti-decreto-101-esposizioni-vincoli-di-dose-AR-22796/>
- <https://www.radon.it/it/3-radioattivita-naturale-e-artificiale/>
- <https://www.world-nuclear-news.org/NN-Russia-connects-BN800-fast-reactor-to-grid-11121501.html>
- <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>
- <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/heavy-manufacturing-of-power-plants.aspx>
- <https://pris.iaea.org/pris/home.aspx>
- <https://www.framatome.com/en/>
- <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Second-Chinese-EPR-achieves-criticality>
- <https://www.worldnuclearreport.org/Europe-s-First-EPR-13-Years-Behind-Schedule-Olkiluoto-3-in-Finland-Starts-Up.html>
- <https://www.framatome.com/en/customers/nuclear/hinkley-point-c/>
- <https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/hinkley-point-c>
- <https://www.edfenergy.com/energy/nuclear-new-build-projects/sizewell-c>
- <https://www.onr.org.uk/hinkley-point-c/index.htm>
- <https://infrastructure.planninginspectorate.gov.uk/projects/eastern/the-sizewell-c-project/>
- <https://www.gov.uk/government/news/the-sizewell-c-project-development-consent-decision-announced>
- <https://www.french-nuclear-safety.fr/asn-informs/news-releases/break-preclusion-epr2-reactor>
- <https://www.westinghousenuclear.com/energy-systems/ap1000-pwr>
- <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Further-delay-in-startup-of-Vogtle-AP1000s>
- <https://info.westinghousenuclear.com/news/poland-selects-wec-ap1000>
- <https://web.mit.edu/kshirvan/www/research/ANP193%20TR%20CANES.pdf>
- <https://www.ans.org/news/article-3933/china-greenlights-four-additional-ap1000-reactors/>
- <https://world-nuclear-news.org/Articles/AP1000-remains-attractive-option-for-US-market-say>
- <https://www.powermag.com/china-will-add-two-more-ap1000-nuclear-reactors/>
- <https://www.world-nuclear-news.org/Articles/Westinghouse-and-Energatom-expand-plans-to-nine-A>
- <https://www.kins.re.kr/en/index>
- <https://www.nssc.go.kr/en/index.do>
- <https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/main.do>
- <https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/G/htmlView/ENGCHP00202.do?menuCd=EN07040202>
- <https://www.power-technology.com/projects/ulchin-nuclear-power-plant/>
- <https://www.txfnews.com/articles/5845/UAE-secures-24-4bn-for-its-first-nuclear-power-plant>
- [https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/G/htmlView/ENGEHP00102.do?menuCd=EN07060102#:~:text=The%20APR1400%20reactor%20s%20safety%20systems,Feed%20Water%20System%20\(AFWS\).](https://home.kepco.co.kr/kepco/EN/G/htmlView/ENGEHP00102.do?menuCd=EN07060102#:~:text=The%20APR1400%20reactor%20s%20safety%20systems,Feed%20Water%20System%20(AFWS).)
- http://www.gidropress.podolsk.ru/en/projects/modern_projects.php
- <https://nuclear.gepower.com/build-a-plant/products/nuclear-power-plants-overview/abwr>
- https://www.synapse-energy.com/sites/default/files/SynapsePaper.2008-07.0.Nuclear-Plant-Construction-Costs.A0022_0.pdf

- <https://www.ipen.br/biblioteca/cd/genes4/2003/papers/1053-final.pdf>
- <https://www.tepco.co.jp/en/hd/ourbusiness/nuclear/higashi-dori/index-e.html>
- <https://www.nra.go.jp/english/>

Riferimenti normativi e tecnici

Quadro normativo italiano in materia nucleare:

- Decreto Legislativo 31 luglio 2020, n. 101 "Attuazione della direttiva 2013/59/Euratom, che stabilisce norme fondamentali di sicurezza relative alla protezione contro i pericoli derivanti dall'esposizione alle radiazioni ionizzanti, e che abroga le direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 97/43/Euratom e 2003/122/Euratom e riordino della normativa di settore in attuazione dell'articolo 20, comma 1, lettera a), della legge 4 ottobre 2019, n. 117".
- Legge 31 dicembre 1962, n. 1860 – Impiego pacifico dell'energia nucleare.
- Decreto Legislativo 17 marzo 1995, n. 230 s.m.i. - Attuazione delle direttive 89/618/Euratom, 90/641/Euratom, 96/29/Euratom, 2006/117/Euratom in materia di radiazioni ionizzanti, 2009/71/Euratom in materia di sicurezza nucleare degli impianti nucleari e 2011/70/Euratom in materia di gestione sicura del combustibile esaurito e dei rifiuti radioattivi derivanti da attività civili.
- Guida Tecnica N. 26 – Gestione dei rifiuti radioattivi, 1987.
- Guida Tecnica N. 30 – Criteri di sicurezza e radioprotezione per depositi di stoccaggio temporaneo di rifiuti radioattivi e di combustibile irraggiato", ottobre 2020.
- Guida Tecnica N. 32 - Criteri di sicurezza e di radioprotezione per impianti ingegneristici di smaltimento in superficie di rifiuti radioattivi, Ottobre 2021.
- Decreto Interministeriale 7 agosto 2015 – Classificazione dei rifiuti radioattivi.
- Norma UNI 11784 "Manufatti di rifiuti radioattivi - Contenitori per rifiuti radioattivi solidi di media attività - Caratteristiche e requisiti", aprile 2020.
- Decreto Legislativo 3 aprile 2006, n. 152 - Norme in materia ambientale.









ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI ROMA

Piazza della Repubblica, 59 - 00185 - Roma

Tel. 06.487.93.11 - Fax: 06.487.931.223

Cod. Fisc. 80201950583

Orari di apertura al pubblico degli uffici

Lunedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Martedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Mercoledì 09:30-12:30 14:30-17:30

Giovedì 09:30-12:30 14:30-17:30

Venerdì 09:30-12:30

Sabato 09:30-12:30

La Segreteria dell'ordine chiude alle 16.00

AREE DEL SITO WEB DEL QUADERNO



AREA CIVILE AMBIENTALE

<https://rivista.ording.roma.it/civile/>



AREA INDUSTRIALE

<https://rivista.ording.roma.it/industriale/>



AREA DELL'INFORMAZIONE

<https://rivista.ording.roma.it/informazione/>



AREA INTERSETTORIALE

<https://rivista.ording.roma.it/intersectoriale/>



È possibile consultare tutti i numeri
all'indirizzo Internet
ioroma.info



Quaderno Speciale



*Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
Piazza della Repubblica, 59 - 00185 Roma
www.ording.roma.it*