

Gruppo di Lavoro 2
Tecnologie di fissione

RAPPORTO FINALE

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

INDICE

CAP. 1 - GENERALITÀ.....	6
C1-1 SOMMARIO	6
C1-2 OBIETTIVI E FINALITÀ DEL GDL 2: <i>TECNOLOGIE DI FISSIONE</i>	10
C1-3 COMPONENTI DEL GDL 2	11
1-3.1 MEMBRI	12
1-3.2 OSSERVATORI	13
C1-4 FINALITÀ DEL RAPPORTO	14
CAP. 2 - SCENARIO INTERNAZIONALE.....	16
C2-1 NUOVE TECNOLOGIE	16
C2-2 CONTESTO INTERNAZIONALE	19
2-2.1 CINA	20
2-2.2 COREA DEL SUD	21
2-2.3 FRANCIA	21
2-2.4 GIAPPONE.....	22
2-2.5 GRAN BRETAGNA	23
2-2.6 RUSSIA	23
2-2.7 STATI UNITI	24
2-2.8 UNIONE EUROPEA	25
C2-3 COLLABORAZIONI IN ESSERE DA PARTE DI ORGANIZZAZIONI ITALIANE	26
CAP. 3 - SCHEDE TECNICHE DELLE PRINCIPALI FILIERE	29
C3-1 SCHEDA SMR.....	31
C3-2 SCHEDE AMR.....	32
3-2.1 SCHEDA GFR	32
3-2.2 SCHEDA LFR	33
3-2.3 SCHEDA MSR	33
3-2.4 SCHEDA SCWR.....	34
3-2.5 SCHEDA SFR.....	35
3-2.6 SCHEDA VHTR.....	36
C3-3 SCHEDA MR.....	36

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

CAP. 4 - CONTESTO NAZIONALE..... 38

C4-1	UTILIZZATORI	38
C4-2	INGEGNERIA DEI SISTEMI NUCLEARI INNOVATIVI	40
C4-3	CATENA DI FORNITURA	42
C4-4	RICERCA, SVILUPPO E FORMAZIONE	44
C4-5	CONSIDERAZIONI GENERALI	46

CAP. 5 - CONCLUSIONI..... 54

CAP. 6 - ELABORAZIONE DI PROPOSTE..... 56

C6-1	STATO DELLO SVILUPPO DELLE FILIERE SELEZIONATE E PRINCIPALI CRITICITÀ ESISTENTI	56
6-1.1	SMR.....	58
6-1.2	AMR (LFR).....	59
6-1.3	MR.....	60
C6-2	ATTIVITÀ NECESSARIE PER LA SOLUZIONE DELLE CRITICITÀ	61
6-2.1	SMR.....	64
6-2.2	AMR (LFR).....	65
6-2.3	MR.....	68
C6-3	RICOGNIZIONE DELLE SPECIFICHE COMPETENZE ITALIANE E COLLABORAZIONI INTERNAZIONALI IN ESSERE	69
6-3.1	SMR.....	69
6-3.2	AMR (LFR).....	71
6-3.3	MR.....	72
C6-4	VALUTAZIONE DELLE POSSIBILI ATTIVITÀ NAZIONALI PER SUPPORTARE LO SVILUPPO DELLE FILIERE SELEZIONATE.....	73
6-4.1	SMR.....	77
6-4.2	AMR (LFR).....	79
6-4.3	MR.....	81
C6-5	PRIME CONSIDERAZIONI SUI COSTI DI RICERCA, SVILUPPO E QUALIFICAZIONE DELLE SOLUZIONI SELEZIONATE.....	81
6-5.1	SMR.....	83
6-5.2	AMR (LFR).....	83
6-5.3	MR.....	84

CAP. 7 - ROADMAP 85

C7-1	REALIZZAZIONE DI SISTEMI PROTOTIPALI E DEI PRIMI REATTORI DI PRODUZIONE.....	85
7-1.1	CONTESTO TEMPORALE DI RIFERIMENTO.....	85
C7-2	ANDAMENTO TEMPORALE DELLE ATTIVITÀ INDUSTRIALI E DI RICERCA E SVILUPPO PER LE SOLUZIONI DI RIFERIMENTO	

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

C7-3	QUADRO FINANZIARIO PLURIENNALE A SUPPORTO DELLE ATTIVITÀ DI SVILUPPO E QUALIFICA DELLE FILIERE SELEZIONATE	89
CAP. 8 -	<u>LINEE GUIDA</u>	<u>91</u>
	<u>BIBLIOGRAFIA</u>	<u>94</u>
ALLEGATO A	<u>SCHEDE TECNICHE DELLE FILIERE CONSIDERATE.....</u>	<u>95</u>
A.1	SCHEDA SMR.....	97
A.2	SCHEDE AMR.....	99
A.2.1	SCHEDA GFR.....	99
A.2.2	SCHEDA LFR.....	101
A.2.3	SCHEDA MSR.....	103
A.2.4	SCHEDA SCWR.....	105
A.2.5	SCHEDA SFR.....	107
A.2.6	SCHEDA VHTR.....	109
A.3	SCHEDE MR.....	111
ALLEGATO B	<u>ELABORAZIONE DEI QUESTIONARI: AGGREGAZIONE DEI DATI</u>	<u>113</u>
B.1	GENERALITÀ.....	113
B.1.1	TECNOLOGIE NUCLEARI SULLE QUALI LE ORGANIZZAZIONI VANTANO ESPERIENZA	113
B.1.2	RUOLI CON CUI LE ORGANIZZAZIONI HANNO CONTRIBUITO ALLE TECNOLOGIE DI INTERESSE	113
B.1.3	TRASPONIBILITÀ DELL'ESPERIENZA PREGRESSA ALLE TECNOLOGIE NUCLEARI AVANZATE	114
B.2	APPROFONDIMENTO	114
B.2.1	PRIORITIZZAZIONE DEGLI ATTRIBUTI DI UN POSSIBILE FUTURO IMPIANTO NUCLEARE AVANZATO IN ITALIA.....	114

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1. Mappa dei progetti di sistemi avanzati in fase di sviluppo, per nazione [3].	20
Figura 2. Distribuzione delle risposte degli intervistati per grado di rilevanza, relativamente agli attributi di un potenziale impianto nucleare in Italia.	48
Figura 3. Dettaglio delle azioni volte allo sviluppo e potenziamento di una catena del valore nazionale nell'ambito dell'utilizzo della Fissione Nucleare, come identificate dal GdL 2.	86

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1. Definizioni delle metriche impiegate nella valutazione del grado di maturità delle diverse tecnologie in merito agli aspetti di design, licensing e supply chain.	30
Tabella 2. Elenco dei membri del GdL 2 che hanno risposto al questionario di indagine.	47
Tabella 3. Elenco delle caratteristiche e dei sottostanti principi emersi come più rilevanti dall'analisi delle risposte al questionario sottoposto ai membri del GdL 2	50

CAP. 1 - GENERALITÀ

C1-1 Sommario

Il Gruppo di Lavoro (GdL) 2 “Tecnologie di fissione”, istituito nel contesto della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile (“Piattaforma”), opera con l’obiettivo di fornire il proprio contributo all’istruttoria per la verifica di fattibilità della ripresa della produzione di energia per via nucleare in Italia, come pure per la proposta di un piano di azione per raggiungere questo obiettivo, a beneficio del Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica per valutare se e come le nuove tecnologie nucleari sostenibili possano concorrere a livello italiano al raggiungimento degli “obiettivi europei in materia di riduzione delle emissioni, nonché al fine di accrescere la sicurezza e la sostenibilità degli approvvigionamenti di energia e di rafforzare le opportunità di crescita della filiera industriale nazionale attualmente operante nel settore”.

Operando in coerenza con il Piano Nazionale Integrato per l’Energia e il Clima (PNIEC), l’intervallo temporale di interesse del GdL 2 è fra il 2030 e il 2050, traguardando in tali date lo sviluppo di soluzioni innovative delle filiere tecnologiche Small Modular Reactor – SMR, Micro Reactor – MR e Advanced Modular Reactor – AMR di quarta generazione, attualmente in fase dimostrativa e prototipale.

Il GdL 2 riunisce in maniera ampia soggetti rappresentativi di tutte le realtà relative al nucleare da fissione: ricerca/formazione, ingegneria, fornitura di componenti e servizi, generazione e distribuzione di energia e, infine, utilizzatori di energia.

Il lavoro di ricognizione svolto e riassunto nel rapporto emesso si è basato su uno schema strutturato in più parti. All’inizio si è effettuata un’analisi delle tecnologie nucleari innovative più promettenti, mediante l’esame dello scenario internazionale di settore, della valutazione del grado di maturità tecnica delle diverse filiere, delle attività in corso nei paesi più rappresentativi e delle collaborazioni internazionali in cui sono coinvolte realtà italiane.

Successivamente si è passati ad analizzare, con il necessario dettaglio, lo stato delle competenze, degli accordi e delle attività condotte in Italia da aziende, enti ed università così da articolare un quadro autentico ed attuale della situazione.

Il rapporto include anche delle schede tecniche, rappresentative delle tecnologie di interesse e prodotte sulla base della conoscenza di letteratura, delle indicazioni industriali disponibili e della specifica competenza tecnica dei partecipanti al GdL, che costituiscono un indispensabile strumento per le successive valutazioni

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

tecniche ed economiche, ed in particolare le simulazioni di scenario a cura del GdL 1 "Contesto, scenari e prospettive".

Il censimento delle competenze e capacità nazionali è stato condotto mediante un opportuno questionario compilato dai partecipanti al GdL 2.

Tale questionario è strutturato in due parti. La prima parte ha lo scopo di censire e valutare le competenze e le esperienze nel settore nucleare dei soggetti partecipanti al GdL, siano esse maturate in attività sui reattori di generazione attuale quanto sui sistemi innovativi in sviluppo.

La seconda parte, invece, è dedicata ad un approfondimento degli attributi che un futuro impianto nucleare avanzato da realizzare in Italia dovrebbe possedere, e quali aspettative e quali vantaggi ci si possono attendere da questa filiera energetica nel panorama nazionale.

In sintesi, nel rapporto prodotto l'esame del quadro internazionale ha evidenziato l'intensa attività in corso relativa allo studio, progettazione a diversi livelli, pre-licensing, avvio di progetti realizzativi sui reattori innovativi per la produzione di energia elettrica, ma anche in diversi casi di altri vettori (calore, idrogeno), per gli SMR, gli AMR e gli MR.

Una caratteristica comune a questi progetti è la scelta di taglie unitarie (potenza elettrica installata per singolo reattore) nettamente più piccole rispetto agli impianti nucleari esistenti, di regola nell'intervallo 200 – 500 MW (*Small Modular Reactor* e *Advanced Modular Reactor*), ma in certi casi (*Micro Reactor*) anche di solo qualche decina di MW.

Tale tendenza appare giustificata dall'aspettativa che la modularità dei sistemi di impianto – agevolata dalla piccola taglia – consenta di predisporre in misura maggiore le lavorazioni in catene produttive direttamente in fabbrica, a vantaggio di una minor durata e complessità delle operazioni sul sito, con presumibile miglior qualità e minori costi.

Nel caso degli *Advanced Modular Reactor*, a tale evoluzione verso potenze più basse si accompagna spesso la scelta di spettri neutronici veloci, che aprono la strada ad un ciclo del combustibile chiuso (molto ridotta necessità di estrazione del materiale fissile e incremento di almeno due ordini di grandezza della disponibilità di energia da fonte nucleare), quindi ad una riduzione molto consistente della necessità di depositi di rifiuti nucleari di lunghissima durata.

Il ciclo del combustibile rappresenta un altro importante fattore. Nel caso degli SMR ad acqua leggera il combustibile è pressoché disponibile, mentre nel caso di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

sistemi veloci è noto e qualificato ma deve esserne riattivata la produzione; nel caso dei sistemi MR è in corso la fase di qualifica.

A partire dai livelli già elevati di sicurezza degli impianti nucleari dell'attuale terza generazione, occorre rilevare che un altro importante aspetto positivo, e comune a quasi tutte le filiere innovative, è proprio quello della sicurezza. Ottimi livelli sono infatti raggiungibili grazie all'impiego di caratteristiche intrinseche e meccanismi più semplici e spesso passivi per ridurre la probabilità di accadimento, e fronteggiare – nell'eventualità residua – gli eventi incidentali, consentendo in alcuni casi anche la possibilità di limitare la zona di predisposizione alle emergenze al perimetro del sito, cosa che può tradursi anche in un'accresciuta accettabilità sociale.

L'esame delle realtà italiane impegnate nel settore dell'energia nucleare ha rivelato un comparto molto attivo e vivace, con la copertura di quasi tutte le fasi progettuali e realizzative, dall'ingegneria di sistema alla fabbricazione di componenti, dalle attività di ricerca a quelle di formazione universitaria, con un grado di coinvolgimento in progetti internazionali che si può valutare medio-alto. Degno di nota è stato in questa fase anche l'emergere di una forte attesa da parte di molti partecipanti per l'avvio di un programma di sostegno allo sviluppo delle filiere prioritarie selezionate, che permetta di sostenere e rafforzare il tessuto industriale che opera nell'ingegneria e nella fornitura.

All'interno del GdL, l'analisi delle indicazioni fornite dai partecipanti sulla rilevanza delle caratteristiche che dovrebbero possedere gli impianti da installare in futuro in Italia ha mostrato una chiara convergenza su 4 aspetti principali, illustrati nella tabella che segue.

Caratteristiche	Principi rilevanti
Sfruttamento del know-how italiano per l'approntamento Coinvolgimento dell'industria italiana alla realizzazione Sfruttamento delle competenze italiane per la ricerca residua Ricadute – anche orizzontali – sul business aziendale Mercato estero per aziende italiane	Valorizzazione competenze italiane
Semplificazione dei requisiti dei piani di emergenza Chiusura del ciclo e minimizzazione delle scorie	Accettabilità (sostenibilità, sicurezza)
Costo di costruzione	Costo della tecnologia
Maturità della tecnologia e tempo per la disponibilità	Tempi di avvio produzione di energia

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Dall'incrocio puntuale e coerente delle competenze e degli interessi delle realtà italiane con lo stato di sviluppo tecnico delle filiere e con la situazione internazionale, si è potuti giungere a identificare tre tecnologie che appaiono di particolare interesse e rilevanza per l'Italia:

- Small Modular Reactors (SMR) moderati e refrigerati ad acqua leggera;
- Advanced Modular Reactors (AMR) con utilizzo di piombo liquido come refrigerante, a spettro neutronico veloce (Lead-cooled Fast Reactors, LFR);
- Micro Reactors (MR) ad alta temperatura e taglia inferiore a 50 MWth.

Dato il diverso grado di maturità dei progetti e il rilevante bagaglio di esperienza accumulato sui grandi reattori ad acqua odierni (LWR), in significativa misura trasferibile agli SMR ad acqua, è ragionevole ipotizzare una sequenzialità nello sviluppo delle diverse filiere, con una prima fase di sfruttamento degli SMR, già a partire dalla metà degli anni '30, e un successivo affiancamento degli AMR, tra la fine degli anni '30 ed i primi '40, anche nell'ottica della chiusura del ciclo del combustibile. Gli MR rappresentano anch'essi una tecnologia di potenziale interesse, a complemento delle precedenti due, per soddisfare specifici fabbisogni di energia elettrica e calore dei comparti industriali "hard-to-abate", in modalità cogenerativa e con impianti di piccola taglia.

L'opportunità di disporre dell'opzione nucleare avanzata, come soluzione possibile ed adeguata per concorrere agli obiettivi di decarbonizzazione ed al bilancio energetico nel medio termine, si accompagna con quella di creare e sostenere in Italia una filiera industriale e produttiva a supporto di tali tecnologie.

La possibilità di cogliere tali opportunità è condizionata alla preparazione del contesto nazionale, per la quale sono identificate le azioni/riflessioni di seguito riportate in ordine logico e non necessariamente cronologico.

Ambito	Azioni	Tempi
n.a.	Definizione di una politica energetica chiara, con assunzione di un impegno stabile e di lungo termine	Tempo 0
n.a.	Istituzione di un sistema di coordinamento, e di un tavolo di consultazione delle parti interessate	Anno 1
n.a.	Adozione di schemi di collaborazione pubblico-privato	Anni 1 - 2
GdL 2	Selezione dei progetti di riferimento	Anno 1
GdL 2	Definizione dei programmi di ricerca applicata, sviluppo industriale e qualifica relativi ai progetti di riferimento	Anno 1
GdL 2	Stipula di accordi strategici – a livello aziendale ed istituzionale – con altri Paesi per la realizzazione dei FOAK	Anni 2 - 4
GdL 2	Definizione delle modalità di cooperazione pubblico-privato per il finanziamento dell'installazione dei sistemi	Anni 6 - 10

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Per far fronte alle necessità generali dello sviluppo delle tecnologie di riferimento, ed a supporto dell'approntamento della filiera industriale e produttiva nazionale, nell'intervallo temporale atteso si può valutare come adeguato un investimento pubblico pari a 2 Miliardi di euro. Tali risorse, naturalmente, costituiscono solamente una frazione dello sforzo complessivo e vanno ad integrare gli investimenti privati già previsti, che risultano essere ad oggi non inferiori a tale cifra.

C1-2 Obiettivi e finalità del GdL 2: *Tecnologie di fissione*

La Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile ("Piattaforma") nasce presso il Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica ("Ministero") con Decreto Ministeriale ("DM") 16 novembre 2023, con lo scopo specifico "di consentire al Ministero di definire in tempi certi un percorso finalizzato alla possibile ripresa dell'utilizzo dell'energia nucleare in Italia attraverso le nuove tecnologie nucleari sostenibili in corso di sviluppo".

La finalità del Ministero, come chiaramente esplicitato nel DM, è quindi quello di valutare se e come le nuove tecnologie nucleari sostenibili, sia nel campo della fissione quanto della fusione nucleare, possano risultare rilevanti nel raggiungimento degli "obiettivi europei in materia di riduzione delle emissioni, nonché al fine di accrescere la sicurezza e la sostenibilità degli approvvigionamenti di energia e di rafforzare le opportunità di crescita della filiera industriale nazionale attualmente operante nel settore."

Un obiettivo ambizioso per l'Italia che dal 1987 ha sostanzialmente abbandonato l'uso della fonte nucleare per la produzione di energia elettrica e che oggi rinnova l'interesse per questa tecnologia nella stringente necessità dettata dalle esigenze di una progressiva riduzione delle emissioni di anidride carbonica dei sistemi energetici e produttivi, traguardando l'obiettivo temporale di piena decarbonizzazione al 2050.

L'Italia in campo energetico si è dotata negli anni di un Piano Nazionale Integrato per l'Energia e il Clima (PNIEC), ad oggi in via di ulteriore aggiornamento, che definisce gli obiettivi nazionali al 2030 su efficienza energetica, fonti rinnovabili e riduzione delle emissioni di CO₂, come anche quelli in tema di sicurezza energetica, interconnessioni, mercato unico dell'energia e competitività, sviluppo e mobilità sostenibile.

In questa analisi con orizzonte 2030 il focus del PNIEC è rivolto alle tecnologie a zero emissioni nette e con elevata maturità tecnologica, ma chiarisce che per raggiungere l'obiettivo sfidante del 2050 sarà necessario lo sviluppo di tecnologie che attualmente sono in fase dimostrativa o prototipale quali quelle del nucleare innovativo.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

L'intervallo temporale di interesse per lo sviluppo di queste tecnologie è quindi fra il 2030 e il 2050, con l'avvertenza che per ottenere un contributo sostanziale al raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione totale al 2050 sarebbe auspicabile che esse possano traguardare il mercato in relativo anticipo.

Da questa situazione fattuale emergono le ragioni per il rinnovato interesse per l'uso del nuovo nucleare, qui inteso come una tecnologia evolutiva o innovativa che si mostri sufficientemente affidabile per rispondere alle esigenze di quegli scenari energetici al 2050 che vedono una sempre maggiore penetrazione delle energie rinnovabili non programmabili ma che indicano comunque la necessità di disporre di una quota di energia da fonti programmabili, a basso o nullo rilascio di anidride carbonica, che consenta inoltre di soddisfare le esigenze di bilanciamento e ottimizzazione del sistema elettrico nazionale.

In funzione di quanto detto, l'azione della Piattaforma per le tecnologie del nucleare da fissione si concentra "in particolare nel settore degli Small Modular Reactor – SMR, dei micro reattori, Micro Reactor – MR e degli Advanced Modular Reactor – AMR di quarta generazione".

Come da regolamento istitutivo, la Piattaforma costituisce lo strumento di collegamento fra le realtà nazionali operanti nel settore del nuovo nucleare sostenibile, della sicurezza, della radioprotezione e dei rifiuti radioattivi ed il Ministero, ed al contempo è il soggetto a cui è delegata l'istruttoria per la verifica di fattibilità della ripresa della produzione di energia per via nucleare in Italia, come pure per la proposta di un piano di azione per raggiungere questo obiettivo.

La Piattaforma quale strumento operativo è strutturata in sette gruppi di lavoro con funzioni ed obiettivi differenti ma che tutti assieme concorrono alla definizione di un possibile percorso per l'attivazione e l'inserimento del nucleare innovativo nel mix energetico italiano.

C1-3 Componenti del GdL 2

Il criterio principale seguito nella costituzione del GdL 2 è stato quello di riunire soggetti, il più possibile rappresentativi, di tutta la catena del valore relativa al nucleare da fissione. I settori rappresentati sono la ricerca/formazione, l'ingegneria, la fornitura di componenti e servizi, la generazione e distribuzione di energia ed infine genericamente quello degli utilizzatori di energia. In aggiunta ai membri del GdL 2, un consistente numero di osservatori si è proposto per contribuire al conseguimento degli obiettivi assegnati al gruppo stesso. Gli osservatori, operanti nel settore industriale, della ricerca e universitario, hanno dimostrato una apprezzabile attività in molteplici campi della tecnologia nucleare da fissione: in virtù della rilevante competenza tecnica ed esperienza in essere, il ruolo di tali osservatori all'interno del GdL 2 è stato considerato paritetico a quello dei membri

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

effettivi. Per tale motivo, ed in considerazione del fatto che le attività del GdL 2 si svolgono nel rispetto dei vincoli di riservatezza sottoscritti da tutti i partecipanti alla piattaforma, le riunioni del GdL 2 sono state condotte collegialmente, senza distinzioni fra membri ed osservatori, allo scopo di condividere la metodologia suggerita per contribuire alla stesura del presente rapporto sulla ricognizione tecnologica.

La quantità e la competenza dei partecipanti al GdL 2, in aggiunta a Ministero, ENEA e RSE, fa di questo gruppo una delle realtà più solide e tecnicamente referenziate per questo settore in Italia.

Di seguito sono riportati i componenti del GdL 2 suddivisi per settore di rappresentanza.

1-3.1 **Membri**

1-3.1.1 Ricerca/formazione

Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare (CIRTEN)

Società Informazioni Esperienze Termoidrauliche (SIET) S.p.A.

1-3.1.2 Ingegneria

Ansaldo Nucleare S.p.A.

newcleo S.p.A.

N.IN.E. s.r.l.

Ultra Safe Nuclear Italia s.r.l.

CAELUS S.r.l.

1-3.1.3 Progettazione/fornitura di componenti/servizi specialistici

ARVEDI Acciai Speciali Terni S.p.A.

ATB Riva Calzoni S.p.A.

Belleli Energy CPE S.r.l.

Mangiarotti S.p.A.

Walter Tosto S.p.A.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

1-3.1.4 Utilities

Edison S.p.A.

ENEL S.p.A.

1-3.1.5 Utilizzatori di energia

DUFERCO Engineering S.p.A.

1-3.2 **Osservatori**

1-3.2.1 Ricerca/formazione

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN)

Politecnico di Milano

Università di Bari

Università di Milano Bicocca

Università di Pisa

Università di Roma La Sapienza

1-3.2.2 Ingegneria

NIER Ingegneria S.p.A. Società Benefit

S.R.S. Servizi di Ricerche e Sviluppo S.r.l.

1-3.2.3 Progettazione/fornitura di componenti/servizi specialistici

Demont S.r.l.

Fincantieri S.p.A.

MERSEN Italia S.p.A.

Nucleco S.p.A.

RINA

SIMIC S.p.A.

X-nano S.r.l.

C1-4 Finalità del Rapporto

Anche se l'obiettivo prioritario della Piattaforma è saggiare la possibilità dell'uso del nucleare innovativo in combinazione con le fonti programmabili in ottica di decarbonizzazione, la valutazione di attrattività non viene condotta in maniera tecnicamente asettica, e separata dalle reali condizioni del contesto nazionale, ma al contrario si deve contemperare con l'opportunità di creare e sostenere in Italia una filiera industriale e produttiva a supporto di queste nuove tecnologie.

Il presente rapporto nella sua prima parte esamina, necessariamente in maniera sintetica, lo stato e le caratteristiche dello sviluppo a livello globale di un numero significativo di tecnologie riconducibili ai sistemi del tipo MR, SMR e AMR, in coerenza con il mandato attribuito alla Piattaforma.

Tale sezione, inoltre, viene doverosamente arricchita da un esame delle collaborazioni internazionali che, soprattutto per un sistema quale quello italiano, sono parte integrante del possibile sviluppo di queste tecnologie.

La seconda parte del rapporto si orienta, invece, verso l'analisi degli interessi e dei contributi nazionali rispetto alle tecnologie in esame al fine di analizzare non solo il valore tecnico delle tecnologie proposte ma, su queste, anche il grado di coinvolgimento possibile per il sistema industriale, di ricerca e formativo italiano.

Questa sintesi virtuosa fra le tecnologie nucleari innovative più promettenti e l'interesse ed il coinvolgimento del "sistema Italia", con la prospettiva della creazione di una o più catene produttive nazionali, viene effettuata mediante l'analisi di un apposito questionario rilasciato, precedentemente rispetto allo sviluppo di questo rapporto, ai partecipanti al GdL 2 "Tecnologie della fissione".

Il questionario è strutturato in una prima parte generale che ha lo scopo di censire e valutare le competenze e le esperienze nel settore nucleare dei diversi attori coinvolti partecipanti al GdL, siano esse maturate in attività sui reattori di generazione attuale quanto sui sistemi innovativi in sviluppo.

La seconda parte del questionario è dedicata ad un approfondimento delle diverse caratteristiche che un futuro impianto nucleare avanzato da realizzare in Italia dovrebbe possedere e quali aspettative e quali vantaggi ci si possono attendere da questa filiera energetica.

Dall'incrocio puntuale di questi dati, caratteristiche delle tecnologie, competenze delle realtà italiane e interesse nazionale, si giunge dunque a una selezione di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

quelle che risultano le tecnologie più promettenti per l'Italia dal punto di vista energetico e della filiera industriale e produttiva.

Il presente rapporto include anche delle schede tecniche di dettaglio, rappresentative delle tecnologie di interesse di questo studio e prodotte sulla base della conoscenza di letteratura, delle indicazioni industriali disponibili e della specifica competenza tecnica dei partecipanti al GdL, che vanno invece a costituire un prezioso strumento di base per le successive valutazioni tecniche ed economiche.

Dati che permetteranno le analisi tese ad accertare, mediante il lavoro del GdL 1 "Contesto, scenari e prospettive", la reale sostenibilità economica dell'utilizzo delle tecnologie selezionate nel mix energetico italiano al 2050 mentre costituiscono un elemento cruciale di ingresso per le attività di adeguamento tecnico normativo in carico ai gruppi di lavoro sul GdL 4 "Sicurezza e prevenzione, quadro normativo, certificazione" e GdL 5 "Rifiuti e decommissioning".

CAP. 2 - SCENARIO INTERNAZIONALE

C2-1 Nuove Tecnologie

Il processo storico di evoluzione delle tecnologie nucleari è stato caratterizzato, nel passato, da due approcci fondanti: da un lato, la focalizzazione su un numero ristretto di tecnologie di riferimento, e dall'altro il costante incremento della taglia degli impianti che venivano realizzati. Entrambi gli approcci trovano giustificazione sulla base di criteri che, in ultima analisi, possono essere ricondotti all'economia di scala.

All'inizio dell'era nucleare è stato analizzato un numero elevato di tecnologie, molto differenti tra loro, che, in molti casi, sono anche state testate sperimentalmente, con la costruzione di dimostratori o finanche prototipi commerciali. Anche grazie a questa indagine ad ampio spettro, è stato possibile apprezzare per intero il potenziale, così come le sfide, di tali tecnologie. Con il passaggio dalla fase sperimentale-dimostrativa a quella di sviluppo commerciale, si è però osservata una generale *selezione naturale*, che ha portato solo alcune di queste tecnologie ad affermarsi come filiere: oggi, la quasi totalità dei reattori in esercizio o in costruzione si basa sulle medesime tre tecnologie ad acqua (reattori ad acqua leggera, pressurizzata – *pressurized water reactor, PWR* – o bollente – *boiling water reactor, BWR* –, e reattori ad acqua pesante pressurizzata – *pressurized heavy water reactor, PHWR*).

Anche in relazione al maggior ritorno di esperienza ottenuto da un numero più elevato di impianti tutti afferenti a poche filiere, la conoscenza e confidenza tecnologica hanno potuto consolidarsi, consentendo di elaborare progetti sempre più affidabili, e di potenza sempre maggiore. L'incremento della taglia degli impianti, infatti, ha consentito nel passato di perseguire economie di scala nella realizzazione dei reattori riducendo così l'impatto dei costi di investimento sull'energia prodotta e migliorando in questo modo il risultato economico finale in termini di costo dell'elettricità per gli utenti.

Ciononostante, negli ultimi venti anni si è osservato un movimento in piena controtendenza, che sta ricevendo interesse in vari paesi del mondo pur essendo ancora in fase di sviluppo.

Da una parte, si è tornati a guardare con interesse al potenziale degli impianti di piccola taglia. Gli impianti di grande taglia (tutti i progetti attualmente sul mercato si posizionano ben oltre il gigawatt di potenza elettrica installata), specialmente quando considerati nella loro prima implementazione (cosiddetta "first-of-a-kind"), sono associati a grandi costi di realizzazione, che di fatto risultano accessibili o solamente alle grandi utility, con elevate disponibilità finanziarie, o al prezzo di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

un largo ricorso a fonti di indebitamento. In entrambi i casi, comunque, la grande taglia può essere associata a tempi di realizzazione più lunghi; dunque, ad un maggior rischio finanziario dato dal posticipare l'avvio del periodo di rientro del capitale investito.

In questo contesto, il concetto di reattore piccolo e modulare – *small modular reactor, SMR* – ha via via preso piede, facendo leva non solo sulla taglia, ma anche sull'attributo di modularizzazione del design e della realizzazione (beneficio reso ancor più facilmente raggiungibile dalla stessa piccola taglia), al fine di serializzare la costruzione (traguardando dunque l'economia di serie in rimpiazzo di quella di scala) e di trasferirne quanta più parte direttamente in fabbrica anziché in situ, per ridurre costi e tempi di costruzione, dunque il rischio economico-finanziario associato. Per ottimizzare questi effetti, quasi tutti i progetti in studio propongono soluzioni che si affidano largamente alla semplificazione dell'impianto, alla standardizzazione delle prassi progettuali e costruttive, nonché all'incremento della sicurezza intrinseca (come peraltro già perseguito in numerosi impianti di ultima generazione anche di grande taglia).

I progetti di SMR attualmente proposti sono caratterizzati, tipicamente, da impianti basati ancora sulle filiere più consolidate^a (PWR, BWR, PHWR), ma con soluzioni progettuali nuove o scalate rispetto ad impianti moderni di grossa taglia essi stessi modulari, ottimizzate a trarre il massimo profitto dalla minor taglia, che generalmente non supera i 300-400 MW elettrici. In generale questi progetti, essendo basati su tecnologia ampiamente nota e provata, possono contare su un processo di qualifica più breve e, in alcuni casi, evitare il passaggio attraverso un dimostratore, riducendo apprezzabilmente il "time-to-market".

L'altro grande filone di innovazione nel settore nucleare concerne altre filiere, differenti da quelle attuali di riferimento, e in larga parte già studiate o anche sperimentate agli albori dell'era nucleare. In questo senso, facendo leva sulla profonda evoluzione tecnologica avvenuta nel corso degli anni, la rappresentazione del potenziale e delle sfide proprie di ciascuna filiera ha subito una rivalutazione, catturata – almeno in termini generali – nel lavoro degli esperti che hanno dato sostanza ai primi passi del Generation-IV International Forum (GIF) e che riguarda gli impianti detti appunto di quarta generazione.

In questo contesto si è progressivamente sviluppato il concetto di reattore avanzato, successivamente esteso anche all'attributo di modularità (anche in questo caso inteso tanto per il design quanto per la realizzazione) come *advanced modular reactor, AMR*. Tale concetto si basa sull'introduzione di soluzioni nuove,

^a Il fatto che i progetti di SMR facciano ancora riferimento alle filiere tecnologiche più consolidate è la ragione per la quale, tipicamente, questi vengano definiti come "evolativi" rispetto agli standard di riferimento (rappresentati dai grandi impianti odierni).

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

tutte elaborate in modo da fare massima leva sulle caratteristiche intrinseche delle tecnologie sottostanti ciascun progetto, mirando così a raggiungere prestazioni superiori nelle aree dell'economicità, della sicurezza e della sostenibilità, ferme restando le caratteristiche di resistenza alla proliferazione e protezione fisica. L'impiego di tecnologie differenti da quella di riferimento^b è in tutti questi casi elemento abilitante per ottenere un miglioramento delle performance che giustifichi l'investimento in tali nuove tecnologie.

Relativamente alla sostenibilità, alcune delle tecnologie AMR offrono una caratteristica – lo spettro neutronico cosiddetto *veloce* – che consente di rendere ancora più efficiente l'utilizzo del combustibile, fino al punto (laddove supportato da una opportuna progettazione del reattore, e affiancato dalle necessarie infrastrutture di lavorazione) di permettere la chiusura del ciclo del combustibile, riciclando continuamente ciò che per i reattori di altra tecnologia (come per quelli attuali) rappresenta un rifiuto, o nei casi migliori, una risorsa solo parzialmente riciclabile.

I progetti di AMR attualmente in fase di sviluppo sono caratterizzati da impianti tipicamente di taglia piccola o media (entro i 600 MW elettrici), ma basati sulle sei tecnologie individuate dal GIF, ovvero reattore veloce refrigerato a gas – *gas-cooled fast reactor, GFR* –, a piombo – *lead-cooled fast reactor, LFR* – o a sodio – *sodium-cooled fast reactor, SFR* –, reattore a sali fusi – *molten salt reactor, MSR* –, reattore ad altissima temperatura – *very-high-temperature reactor, VHTR* – e reattore ad acqua supercritica – *supercritical water reactor, SCWR*.

Un caso particolare di questo processo di innovazione è rappresentato dai reattori di piccolissime dimensioni – *micro reactor, MR*. Tali reattori propongono soluzioni tipicamente basate su tecnologie avanzate (cioè non basate sul tradizionale uso di acqua come refrigerante), applicate ad un segmento di mercato che rappresenta una estremizzazione del processo di riduzione della taglia, traguardando potenze tipicamente inferiori ai 30 MW elettrici. La taglia particolarmente ridotta indirizza in generale gli sviluppatori verso due soluzioni progettuali marcatamente differenti da quelle di tutti gli altri reattori di tipo SMR e AMR: da un lato, si materializza la possibilità di estendere il tempo di impiego del combustibile caricato in nocciolo, progettando tali reattori in modo da renderli capaci di operare senza ricariche intermedie per periodi di tempo particolarmente lunghi (tipicamente superiori a 10 anni, e in alcuni casi anche prossimi ai 20 anni), al fine di ridurre i costi di manutenzione; dall'altro la sensibile riduzione della taglia consente di contenere le dimensioni complessive del reattore, implicando la possibilità di trasportare l'intero reattore già assemblato per la sua installazione sul sito, trasferendo una frazione ulteriore dei lavori di approntamento dal sito stesso alla fabbrica. In alcune

^b Il fatto che i progetti di AMR si basino su tecnologie diverse da quelle più consolidate è la ragione per la quale, tipicamente, si faccia riferimento a tali sistemi come "innovativi" rispetto agli standard odierni.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

condizioni, la combinazione di tali caratteristiche porta gli sviluppatori a proporre soluzioni definite *a batteria*, ovvero dove il reattore viene trasportato già caricato del combustibile necessario per il suo funzionamento; al termine della vita operativa, la ricarica del combustibile avviene per sostituzione dell'intero reattore, rimpiazzato da uno nuovo, identico al precedente, e fornito di combustibile fresco per un ulteriore ciclo operativo. Sicurezza, portabilità ed alta temperatura del calore fornito sono, infine, gli attributi che determinano la vocazione degli MR ad operare direttamente all'interno di stabilimenti industriali per fornire calore di processo, energia elettrica o idrogeno.

Per i progetti più innovativi, che è prevedibile richiedano un dimostratore prima di poter accedere al mercato, è anche rilevante tener conto dell'impatto che può avere sulla tempistica di dispiegamento commerciale il ciclo del combustibile ad essi associato, laddove esso richieda lo sviluppo di combustibili innovativi (ad esempio, per stessa natura o in termini di arricchimento) o di infrastrutture che ne consentano il ritrattamento dopo irraggiamento ed il riciclo.

C2-2 Contesto Internazionale

Sono molteplici le iniziative di ricerca, sviluppo e progettazione, ed in qualche caso già di realizzazione, relative a sistemi avanzati, sia di tipo SMR, che AMR ed MR. Alcune organizzazioni internazionali, prima su tutte l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (AIEA), mantengono dei database aggiornati [1], che raccolgono informazioni e le rendono disponibili in modo centralizzato circa i principali progetti intrapresi a livello mondiale.

Dalla consultazione di simili database, è possibile reperire informazioni quanto più aggiornate possibile in merito non solo alla mappatura di tali iniziative, ma anche allo stato di avanzamento e alle principali caratteristiche tecniche e operative dei rispettivi progetti. In Figura 1 è riportata una panoramica dei principali progetti di sistemi avanzati (SMR, AMR e MR) e della loro distribuzione geografica, per nazione in cui è principalmente focalizzato lo sviluppo.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

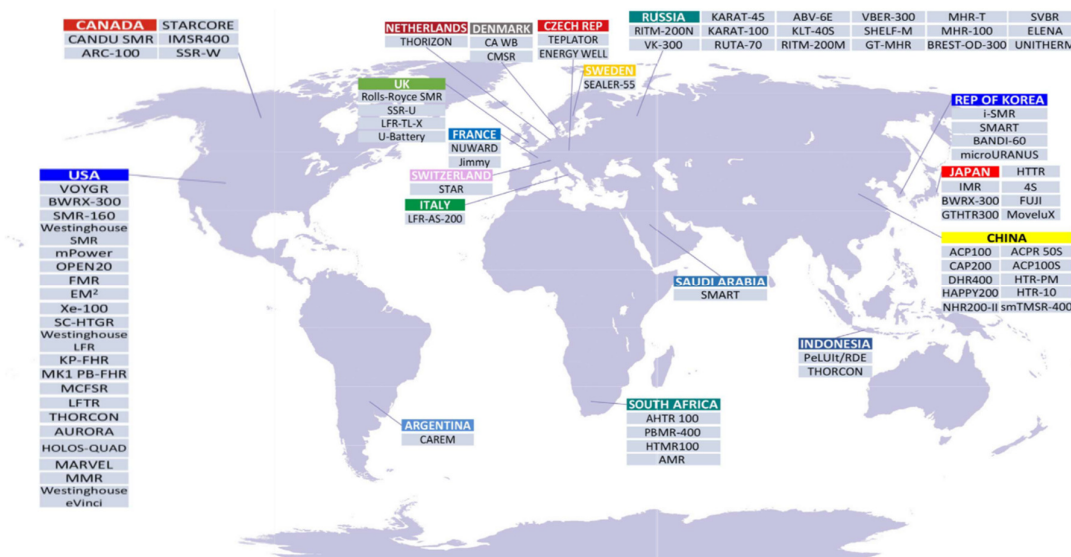


Figura 1. Mappa dei progetti di sistemi avanzati in fase di sviluppo, per nazione [3].

È possibile osservare una tendenza generale di evoluzione dello schema tradizionale, secondo la quale le grandi aziende ed i principali centri di ricerca – storicamente, i soli impegnati nello sviluppo di sistemi nucleari, anche avanzati – sono affiancati da un numero sempre maggiore di piccole aziende, spesso nella fase di startup, che intraprendono il lavoro di sviluppo su un concetto specifico, attraendo fondi – tipicamente privati – a sostegno delle attività necessarie a perseguire vari stadi delle necessarie attività di sviluppo. Se, dunque, in precedenza la distribuzione territoriale dei nuovi progetti di sistemi nucleari era appannaggio esclusivo di alcune, grandi nazioni, è ora comune individuare alcune di queste piccole aziende basate anche in nazioni prive di una vera e propria tradizione nucleare. Ciononostante, è ancora evidente come la massima concentrazione delle iniziative volte allo sviluppo di sistemi avanzati si concentri nelle grandi aziende con un passato storico di tradizione nel settore nucleare.

2-2.1 Cina

Pur mancando di una esperienza storica, nel contesto internazionale la Cina si presenta oggi come uno degli attori più attivi nel campo nucleare, con il più alto tasso di nuovi impianti realizzati nell'ultimo decennio e con i più significativi piani di sviluppo nel prossimo futuro, dispiegando molte delle tecnologie più aggiornate sviluppate in occidente (AP1000 ed EPR), in Russia (VVER) o autonomamente (Hualong).

La Cina è anche particolarmente attiva nello sviluppo delle tecnologie avanzate, con una moltitudine di progetti in fase di sviluppo in tutti i settori di interesse per il presente studio: SMR, AMR ed MR. Questa attitudine all'esplorazione a 360 gradi riflette la determinazione del paese al dispiegamento di una ampia flotta di reattori

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

nucleari per far fronte alla rapida crescita della domanda di energia, e, più recentemente, alla volontà di contribuire agli obiettivi globali di decarbonizzazione, abbandonando progressivamente le fonti fossili sprovviste di tecnologie di abbattimento delle emissioni climalteranti.

Particolarmente impressionante appare l'esplorazione nel campo degli AMR, dove sono in fase di studio e sviluppo concetti afferenti a quasi tutte le sei filiere tecnologiche di IV Generazione. Nel paese sono già in esercizio sistemi sperimentali o dimostrativi delle tecnologie SFR, HTR (precursore della tecnologia VHTR di IV Generazione) e un peculiare MSR a Torio, che rappresentano un elemento di vantaggio per lo sviluppo in tempi brevi dei relativi sistemi AMR.

È inoltre utile citare l'interesse mostrato da alcuni centri di ricerca e da alcune delle principali utility relativamente alla tecnologia LFR, che ha condotto alla realizzazione di alcune infrastrutture sperimentali di particolare rilevanza, allo sviluppo di svariate proposte progettuali, nonché all'intenzione di costruire un dimostratore della filiera nel prossimo futuro.

2-2.2 **Corea del Sud**

Il sistema nucleare della Corea del Sud vanta una tradizione nello studio di reattori di tipo PWR e SFR; sui primi, in particolare, il paese ha recentemente esportato la propria tecnologia negli Emirati Arabi e partecipa a svariate gare in corso in Europa. Sulla scorta di tale tradizione, e con l'avvento delle nuove tendenze di sviluppo per le tecnologie nucleari avanzate, sono stati elaborati due progetti di riferimento, uno afferente alla categoria degli SMR, l'altro a quella degli SFR.

Dal contesto accademico, è stato inoltre elaborato un concetto per un reattore di tipo LFR, il cui stato di sviluppo risulta, comunque, più arretrato rispetto a quello di tipo SMR, che al momento ha già ricevuto l'approvazione normativa del progetto.

2-2.3 **Francia**

Similmente alla Corea del Sud, il sistema francese vanta una consolidata esperienza sulle filiere PWR e SFR, estesa, per entrambe le tecnologie, ben oltre la progettazione, anche alla realizzazione, all'esercizio e allo smantellamento. L'attenzione del paese a queste due tecnologie deriva dalla volontà strategica di implementare un sistema complessivamente capace di realizzare la chiusura del ciclo del combustibile, secondo un approccio a due livelli:

- i reattori di tipo PWR operano in una prima fase, con parte della flotta alimentata da combustibile tradizionale (uranio arricchito) che, allo scarico, viene riprocessato per recuperarne, in particolare, il plutonio generatosi, che

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

viene impiegato per alimentare i reattori della parte restante della flotta, nei quali tale combustibile riciclato viene reimpiegato una volta soltanto;

- i reattori di tipo SFR sono intesi completare la chiusura del ciclo, implementando il riciclo continuo del combustibile esausto che, al termine dell'impiego in reattore, dovrebbe essere riprocessato per riformare nuovo combustibile per i medesimi reattori con una prospettiva indefinita di riuso del medesimo.

Tale strategia resta immutata nelle intenzioni del governo francese, anche se non vi sono più reattori di tipo SFR operanti su suolo francese. Per questa ragione, a partire dai primi anni del nuovo secolo, il sistema francese ha sviluppato un progetto di reattore AMR basato sulla tecnologia SFR, con l'obiettivo di dimostrarne la fattibilità attraverso un dimostratore. Nel 2019, comunque, tale progetto è stato arrestato, e posticipato alla seconda metà del secolo. Per contro, il programma relativo allo sviluppo di reattori PWR resta solidamente in essere, con il recente annuncio del Governo francese di realizzare 6 unità EPR2 di grande taglia, più altre 8 in un secondo momento, per far fronte alla crescita futura della domanda elettrica ed al progressivo venir meno della capacità degli impianti nucleari attualmente in esercizio.

In parallelo a tale iniziativa, sono recentemente stati avviati alcuni nuovi progetti di sistemi avanzati: un SMR basato sulla tecnologia PWR, che vede coinvolte, a fianco dell'industria nucleare e del sistema della ricerca francese, anche industrie italiane ed europee; un AMR basato sulla tecnologia MSR, allo studio di enti di ricerca ed università col supporto di una azienda impegnata sul riprocessamento del combustibile; e diversi progetti di AMR basati sulla tecnologia SFR, intrapresi da altrettante startup gemmate dal principale ente di ricerca nucleare francese, ed uno sulla tecnologia LFR, intrapreso da una startup internazionale, in corso di pre-licensing congiuntamente al progetto di una fabbrica di combustibile MOX dedicata per questa filiera.

2-2.4 Giappone

Anche se i reattori nucleari in esercizio in Giappone appartengono sia alle filiere PWR che BWR, la principale esperienza nazionale è relativa alla tecnologia BWR, sviluppata da alcune delle più grandi aziende nucleari esistenti. In aggiunta a ciò, il Giappone vanta una esperienza di ricerca e sviluppo sulla filiera SFR, culminata con la realizzazione ed esercizio di un reattore sperimentale ed un dimostratore.

Relativamente alle attività di ricerca e sviluppo sui reattori avanzati, sono in fase di progettazione tre sistemi basati sulla tecnologia SFR (uno dei quali calibrato per il segmento degli MR), e quattro sistemi, ciascuno dei quali basato su una tecnologia fra VHTR, GFR, MSR e SCWR. Recentemente, il governo giapponese ha selezionato

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Oltre a nuovi progetti per la più tradizionale filiera di tipo PWR, ed al rilancio dell'estensione del programma relativo alla tecnologia SFR (anche se orientato verso reattori di grande taglia), in Russia sono stati intrapresi molteplici progetti avanzati. Sono in fase avanzata di progettazione diversi progetti di SMR, uno dei quali – esotico in quanto concepito per essere installato su una nave e trasportato ove richiesto, e connesso alla rete elettrica mediante apposite strutture recettive realizzate in porto – è già in esercizio. È inoltre in fase di costruzione un dimostratore della filiera LFR, il cui progetto contempla, presso il sito di installazione, non solo la realizzazione del reattore, ma anche delle fabbriche richieste per il riprocessamento del combustibile esausto e della sua nuova fabbricazione per un successivo riuso in reattore, così da realizzare, nello stesso sito, la chiusura del ciclo del combustibile senza flussi di materiale sensibile tra aree diverse del paese.

Recentemente, la Russia ha dimostrato interesse anche verso una soluzione MR derivata dalla consolidata tecnologia PWR, con svariate proposte ancora però in fase concettuale.

2-2.7 Stati Uniti

L'esperienza principale degli Stati Uniti, maturata fino agli anni '70, si basa sulle tecnologie PWR e BWR, e in modo minore SFR e HTR, proseguita poi con l'esercizio e la costruzione di reattori PWR fino al giorno d'oggi. Nello stesso periodo, negli Stati Uniti è stata maturata anche una esperienza embrionale sulla tecnologia MSR, mediante la costruzione e l'esercizio di un reattore sperimentale.

Gli Stati Uniti sono stati fra i promotori del concetto di SMR, ed i primi ad intraprendere iniziative di progettazione di tali sistemi. Ad oggi, sono molteplici le aziende – incluse le principali dell'industria nucleare, insieme a diverse startup – a proporre concetti di reattori SMR. Alcuni di questi progetti hanno già ottenuto, o hanno applicato per, la certificazione del progetto da parte dell'ente regolatore statunitense.

Al contempo, e anche grazie al supporto finanziario garantito dal Dipartimento dell'Energia americano, esistono svariati progetti di sistemi AMR: con la sola eccezione della tecnologia SCWR, esistono progetti per tutte le altre tecnologie contemplate sotto questa categoria: 1 sulla tecnologia GFR, 2 sulla tecnologia LFR (uno dei quali sviluppato da una delle principali aziende mondiali nel settore nucleare), 4 sulla tecnologia MSR, 2 sulla tecnologia SFR e 2 sulla tecnologia HTR (precursore di quella VHTR di IV Generazione). Sfruttando gli avanzamenti nelle singole tecnologie AMR appena elencate, gli Stati Uniti vantano anche svariate proposte dell'industria privata nel campo degli MR.

2-2.8 Unione Europea

A conclusione di questa panoramica, è utile riportare anche le iniziative di carattere transnazionale condotte a livello europeo e, in alcuni casi, sotto l'egida della Commissione Europea.

In generale, l'approccio comunitario è quello di istituire, o promuovere l'istituzione di contesti (sotto forma di piattaforme, alleanze, partnership) finalizzati a promuovere e sostenere la collaborazione internazionale sui temi della ricerca e sviluppo in ambito nucleare.

Il primo di tali contesti, la *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform* – SNETP, fu istituito nel 2007 come una delle Piattaforme Europee di Innovazione Tecnologica della Commissione Europea, al fine di supportare e promuovere l'esercizio o lo sviluppo sicuro, affidabile ed efficiente dei sistemi nucleari esistenti e futuri in Europa. Dopo una fase iniziale di organizzazione, in cui in particolare SNETP si è dotata di una Agenda Strategica per la Ricerca (*Strategic Research Agenda*) e di una Strategia di Implementazione (*Deployment Strategy*), fra il 2011 ed il 2012 sono stati istituiti i tre organismi attraverso i quali SNETP mette in atto la propria azione:

- NUGENIA (*Nuclear Generation II & III Alliance*), dedicato alla ricerca e allo sviluppo relativo alle tecnologie nucleari attualmente in esercizio o realizzazione, e, per affinità tecnologica, agli SMR, con particolare riguardo all'esercizio sicuro ed efficiente dei sistemi in operazione in Europa;
- ESNII (*European Sustainable Nuclear Industrial Initiative*), dedicato a supportare iniziative industriali volte alla dimostrazione ed implementazione delle filiere tecnologiche di IV Generazione, ivi inclusi i sistemi AMR (e, in parte, MR), al fine di promuovere quei sistemi nucleari capaci di sfruttare appieno le risorse naturali e minimizzare la produzione di rifiuti, attraverso la chiusura del ciclo del combustibile (dunque, preferenzialmente, le tecnologie GFR, LFR ed SFR);
- NC2I (*European Nuclear Cogeneration Industrial Initiative*), dedicato alla dimostrazione di soluzioni innovative e competitive per la cogenerazione di elettricità e calore di processo, e la produzione di idrogeno, mediante sistemi nucleari. Per affinità, molte delle soluzioni proposte sotto la categoria dei sistemi MR sono di diretto interesse per questo organismo.

Nel 2021 la Commissione Europea ha organizzato il primo workshop europeo sugli SMR, catturando il crescente interesse della comunità nucleare europea sul tema. Tra i principali risultati dei lavori del workshop, è stata raccolta la proposta per una Pre-Partnership europea sugli SMR sotto forma di una collaborazione fra gli stakeholder industriali, del mondo della ricerca e dell'università. I lavori della Pre-Partnership hanno predisposto le condizioni per l'istituzione, da parte della Commissione Europea, della *European Industrial Alliance on Small Modular*

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Reactors”, una piattaforma aperta a tutti i soggetti giuridici pubblici e privati (fra questi aziende, associazioni, enti di ricerca, università e centri di formazione) che hanno attività rilevanti nel campo degli SMR. L’alleanza ha l’obiettivo di favorire e accelerare lo sviluppo, la dimostrazione e l’implementazione dei primi progetti SMR in Europa all’inizio degli anni 2030, rivitalizzando e sviluppando, nel contempo, la necessaria catena di approvvigionamento. L’iniziativa include anche le tecnologie AMR, principalmente al fine di identificarne le necessità di ricerca e dimostrazione ai fini del licensing e dell’industrializzazione. L’alleanza, la cui istituzione è stata annunciata dalla Commissione Europea nel 2023, terminerà la raccolta delle adesioni entro aprile 2024 per iniziare i lavori nell’immediato seguito.

C2-3 Collaborazioni in Essere da parte di Organizzazioni Italiane

Il sistema nucleare italiano non ha mai smesso di collaborare, in contesti internazionali, tanto relativamente alla progettazione, fornitura ed installazione di componenti e sistemi per impianti nucleari realizzati all’esterno, quanto in merito alla ricerca, sviluppo e progettazione di sistemi avanzati, inclusi SMR ed AMR di interesse per questa Piattaforma. Le tematiche che vengono portate avanti, attraverso collaborazioni internazionali, dalle società d’ingegneria, dai centri ricerca e dalle università, dalle utility elettriche e dai fornitori di componenti e servizi, riguardano buona parte delle tecnologie nucleari da fissione. Queste attività beneficiano delle esperienze acquisite, negli anni, attraverso la partecipazione ai principali programmi di ricerca e sviluppo oltre che nella costruzione e gestione di impianti nucleari operanti al di fuori del territorio nazionale.

Escludendo solo momentaneamente ogni discussione in merito alla capacità dell’industria nazionale di operare nella progettazione, sperimentazione e qualifica, realizzazione, gestione e manutenzione di impianti in costruzione o in esercizio, che attualmente si estrinseca su sistemi nucleari con caratteristiche che esulano dal perimetro di questo studio, in questa prima parte del presente rapporto ci si concentra sull’analisi delle collaborazioni aventi ad oggetto specificamente lo sviluppo di sistemi nucleari avanzati, di tipo SMR, AMR e MR.

Pur lasciando ogni approfondimento di dettaglio al Cap. 4 -, ove la capacità dell’attuale filiera produttiva è analizzata anche sulla base delle risposte collezionate per il tramite del questionario sottoposto ai membri del GdL 2, si ritiene utile anticipare sin d’ora come l’esistenza stessa di questa capacità rappresenti un elemento strategico, se non essenziale, per un possibile scenario futuro che contempra il ritorno all’impiego dell’energia nucleare da fissione.

Nell’analizzare i contesti internazionali di collaborazione in essere, è in primo luogo utile sottolineare come alcuni attori nazionali – primo su tutti ENEA – abbiano mantenuto un presidio presso alcuni dei principali tavoli di lavoro istituiti in seno alle più importanti organizzazioni internazionali del settore, quali l’Agenzia

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Internazionale per l'Energia Atomica (*International Atomic Energy Agency, IAEA*) dell'ONU, l'Agenzia per l'Energia Nucleare (*Nuclear Energy Agency, NEA*) dell'OCSE, e il Generation-IV International Forum (GIF). Fra i gruppi di lavoro presso i quali l'Italia ha mantenuto una delegazione di rappresentanza, ed ai quali contribuisce attivamente e con apprezzamento, si annoverano tutti quelli aventi ad oggetto i sistemi avanzati di tipo SMR ed AMR.

Relativamente alle collaborazioni finalizzate allo sviluppo di sistemi SMR, l'iniziativa più rilevante nel contesto nazionale è quella intrapresa da Edison – forte dell'appartenenza al gruppo Electricité de France, EdF –, Ansaldo Energia ed Ansaldo Nucleare attraverso la firma, nel marzo 2023, di una lettera d'intenti con EdF per lo sviluppo del nucleare in Europa e, in prospettiva, anche in Italia. Sulla scorta di ciò, il Gruppo EdF, Nuward (una consociata di EdF), Ansaldo Energia e Ansaldo Nucleare hanno sottoscritto a luglio 2023 un accordo strategico e di cooperazione per esplorare lo sviluppo e la promozione commerciale di nuovi impianti basati su tecnologie EdF/Framatome. A novembre dello stesso anno, è stato anche sottoscritto un memorandum di cooperazione tra AIN e GIFEN (Confindustria nucleare francese), Ansaldo Nucleare ed EdF, con l'obiettivo di rafforzare la cooperazione tra Italia e Francia nel settore nucleare e ampliare il portafoglio di costruzioni in Europa con tecnologia EdF.

Tale iniziativa non è l'unica nel panorama nazionale. Ansaldo Nucleare, oltre agli accordi sopra descritti, ha infatti in essere accordi di collaborazione con Rolls Royce e GE-Hitachi per lo sviluppo di componenti e sistemi per i rispettivi progetti di SMR.

È inoltre rilevante registrare la partecipazione di svariati attori nazionali alla Pre-Partnership europea sugli SMR, e la prevista adesione di questi alla costituenda European Industrial Alliance on Small Modular Reactors.

Con riferimento agli AMR a piombo fuso (LFR), Ansaldo Nucleare ha in atto accordi XXXXXXXXXXXXXXXXXXXX per la realizzazione di un first-of-a-kind commerciale nel 2040 e tramite il consorzio FALCON (in partnership con ENEA e con l'ente di ricerca romena RATEN, nonché col supporto di CIRTEN, SRS e Walter Tosto) per la promozione della costruzione in Romania del dimostratore ALFRED. A novembre 2023, è stato inoltre firmato un Memorandum con l'ente di ricerca belga SCK CEN (che vanta competenze maturate nell'ambito del progetto MYRRHA, un Accelerator Driven System a piombo-bismuto), ENEA e Westinghouse, finalizzato alla formazione di un consorzio internazionale che valorizzi le competenze di ciascuna di queste organizzazioni sulla tecnologia LFR al fine di accelerare lo sviluppo di un impianto commerciale basato su tale tecnologia.

Relativamente a tale iniziativa, Mangiarotti è identificato da Westinghouse come uno dei siti strategici per il mercato europeo, per la produzione di componenti

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

chiave [REDACTED], grazie alla capacità produttiva disponibile presso il sito di Monfalcone ed alle dimostrate competenze sulla componentistica per il mercato nucleare attuale ed avanzato.

Sempre nell'ambito degli AMR, la società *newcleo* ha in fase di sviluppo/progettazione un reattore commerciale basato sulla tecnologia LFR, insieme ad un dimostratore di tale tecnologia da realizzarsi in Francia. Con tale fine, il progetto *newcleo* è stato promosso nell'ambito del bando di concorso "Reattori nucleari innovativi" finanziato dal piano di investimenti "Francia 2030" per l'industria nucleare. La società, inoltre, sta progettando un impianto di fabbricazione di combustibile MOX per reattori veloci, per garantirne la disponibilità ai reattori della flotta di cui intende disporre. Per questo programma, *newcleo* si avvale di collaborazioni nazionali ed internazionali, in particolare con il partner tecnologico ENEA, la controllata SRS, i Politecnici di Milano e Torino, l'Università di Pisa e di Roma La Sapienza, e con partner industriali come Walter Tosto. *newcleo* ha inoltre annunciato un [REDACTED] [REDACTED] accordo con Fincantieri-RINA per uno studio di fattibilità LFR in ambito propulsione navale.

Infine, riguardo alla filiera dei micro reactor, va ricordato l'accordo di collaborazione sottoscritto dalla SIMIC e dalla Ultra Safe Nuclear Italia, controllata dalla statunitense USNC (Ultra Safe Nuclear Co.), per lo sviluppo dei reattori MR in Europa e in Italia, quando ce ne saranno i presupposti autorizzativi. L'accordo include la produzione e l'assemblaggio dei principali componenti critici di processo presso le officine SIMIC di Marghera (VE).

In parallelo a tale iniziativa, [REDACTED] Mangiarotti è identificato da Westinghouse come uno dei siti di produzione di componenti per il sistema MR sviluppato dall'azienda statunitense, grazie alle medesime capacità produttive e competenze disponibili presso il sito di Monfalcone.

È utile rilevare come molte delle organizzazioni che partecipano al GdL 2 siano coinvolte in collaborazioni di ricerca aventi ad oggetto la filiera SMR e diverse tecnologie AMR, quali in particolare LFR, SFR, MSR, SCWR. Tali collaborazioni si svolgono nel contesto di progetti di ricerca finanziati dalla Commissione Europea nell'ambito dei Programmi Quadro Euratom.

CAP. 3 - SCHEDE TECNICHE DELLE PRINCIPALI FILIERE

In quest'ultimo capitolo della prima parte del presente rapporto, vengono individuate le caratteristiche salienti dei diversi progetti internazionali afferenti a ciascuna delle tecnologie del nucleare da fissione su cui si concentrano i lavori della Piattaforma, ovvero gli Small Modular Reactor – SMR, i Micro Reactor – MR e gli Advanced Modular Reactor – AMR di quarta generazione.

L'esame di tali caratteristiche è stato concentrato da un lato sui principali parametri, tanto operativi – inclusi gli aspetti di flessibilità di esercizio e potenzialità di cogenerazione di elettricità e calore – quanto economici; dall'altro, sul grado di maturità di tali progetti, anche in relazione alla conseguente disponibilità di questi sul mercato nell'intervallo temporale di interesse per il loro sviluppo, che, come ricordato nell'introduzione, è compresa fra il 2030 e il 2050.

L'individuazione delle caratteristiche salienti è stata effettuata sulla base della conoscenza di letteratura, delle indicazioni industriali disponibili e della specifica competenza tecnica dei partecipanti al GdL. Quest'ultima fonte si è resa necessaria, in particolare, nella valutazione del grado di maturità dei diversi progetti esaminati. In relazione a ciò, e ai fini della proiezione dell'orizzonte temporale di disponibilità sul mercato dei diversi progetti, sono stati riconosciuti come dirimenti gli aspetti legati

- allo stato di avanzamento della progettazione d'impianto (design),
- allo stato di avanzamento del processo di autorizzazione normativa (licensing),
- al grado di coinvolgimento della filiera produttiva necessaria (supply chain) e
- allo stato di avanzamento del processo di fornitura del combustibile (fuel).

Per uniformare il giudizio relativo a tali aspetti essenziali, si è introdotta una metrica semplificata, ispirata a – se non mutuata direttamente da – quella analoga adottata dall'Agenzia per l'Energia Nucleare (NEA) dell'Organizzazione per la Collaborazione e lo Sviluppo Economico (OCSE), nel rapporto "The NEA Small Modular Reactor Dashboard" [2]. Tale metrica si basa su una scala a sei livelli, graduata in modo da rappresentare tanto i progetti nello stato più embrionale (valori pari ad 1), quanto quelli già pienamente compiuti (valori pari a 6). Le definizioni specifiche impiegate per ciascun livello in merito ai tre aspetti dirimenti sono riassunte nella seguente tabella.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Tabella 1. Definizioni delle metriche impiegate nella valutazione del grado di maturità delle diverse tecnologie in merito agli aspetti di design, licensing e supply chain.

	1	2	3	4	5	6
Design	Progetto pre-concettuale	Progetto concettuale	Progetto di dettaglio	Progetto esecutivo	Progetto "as built"	Collaudo
Licensing	Qualifiche di sistema	Pre-licensing	Rapporto di sicurezza sottomesso	Design certificato	Costruzione autorizzata	Esercizio autorizzato
Supply chain	Potenziali fornitori contattati	Potenziali fornitori coinvolti in forniture prototipali	Contratti di fornitura in essere	Partnership e consorzi EPC costituiti	Costruzione del First-of-a-Kind	Costruzione del Nth-of-a-Kind
Fuel	Potenziali fornitori contattati e/o studi di fattibilità in essere	Potenziali fornitori coinvolti e/o progetto di una linea di produzione	Contratti o accordi vincolanti in essere con la catena di fornitura e/o costruzione di una fabbrica dedicata	Fabbrica in esercizio capace di fornire combustibile adatto	Contratto in essere per la fornitura del combustibile per il First-of-a-Kind	Combustibile in caricamento nel First-of-a-Kind

I dati rappresentativi per le tecnologie di interesse così individuati sono infine raccolti nelle schede tecniche di dettaglio riportate nel seguito. Laddove i valori stabiliti come riferimento per ciascuna caratteristica provengano direttamente dalla letteratura, da indicazioni ricevute direttamente per consultazione dei partecipanti al GdL, o da una valutazione esperta espressa dai medesimi partecipanti, nelle schede che seguono essi sono stati marcati con le note "(L)", "(C)" e "(V)", rispettivamente. Relativamente alle fonti di letteratura, si è attinto, oltre che dalla già citata SMR Dashboard della NEA, anche dal database IAEA sui progetti nucleari [1], ed in particolare da un estratto di questo [3] specificamente rivolto ai progetti avanzati di tipo SMR, AMR e MR. Ogni ulteriore referenza

specifica ad una data filiera tecnologica sarà indicata nell'introduzione alla relativa scheda.

C3-1 Scheda SMR

Tra le varie tipologie di progetti SMR, sono qui presi in rassegna solamente quelli basati su reattori ad acqua leggera (dunque ad acqua pressurizzata o bollente). Questi sono basati sulla tecnologia dei reattori di più grandi dimensioni: considerando questo elemento di continuità, questi reattori beneficiano di tutta l'attività di ricerca sviluppata nelle ultime decadi e di tutta l'esperienza operativa derivante dall'esercizio degli LWR di grande taglia. D'altra parte, alcuni SMR implementano modifiche impiantistiche finalizzate ad adattarne l'applicabilità e ad ottimizzarne le performance relativamente alla taglia di riferimento (discostandosi dunque da alcune di quelle caratteristiche tipiche degli LWR), mentre altri massimizzano l'adozione di soluzioni ingegneristiche già dimostrate in analoghi reattori di grande taglia, scalandole in dimensioni o in numero al fine di ridurre il rischio ed i tempi di sviluppo.

Le principali modifiche implementate negli SMR sono:

- la riduzione della potenza unitaria;
- la sostituzione dei sistemi di sicurezza attiva con sistemi di sicurezza passiva, laddove non già presenti negli impianti di grande taglia (per esempio sistemi di iniezione ad alta e bassa pressione di tipo passivo, sistemi di rimozione del calore di decadimento di tipo passivo, ecc.), o combinazione di sistemi passivi e attivi;
- la possibilità di utilizzare, in alcuni casi, la circolazione naturale anche per rimuovere la potenza nominale durante le normali condizioni operative;
- il possibile ricorso ad una configurazione integrata: in un unico recipiente in pressione sono collocati il nocciolo, il generatore di vapore e il pressurizzatore.

Queste caratteristiche, combinate con il minor inventario radiologico nel nocciolo dovuto alla minor taglia, determinano la possibilità di ipotizzare una riduzione della zona di predisposizione alle emergenze (*emergency planning zone*) intorno all'impianto, rispetto all'estensione tipica di un reattore LWR standard, e quindi aumentando le opportunità di localizzazione di questi impianti.

Relativamente alle potenzialità operative degli SMR, si rileva l'indicazione generale di una riconosciuta facilità di modulazione della potenza a seguire variazioni di carico richieste dalla rete. Infine, pur nel limite del range di temperature operative raggiunte dai sistemi SMR (limitato dall'impiego di acqua a poco più di 300 °C), per tutti gli SMR indagati si riconosce una potenzialità di cogenerazione per la produzione di calore di processo e di idrogeno, a supporto della decarbonizzazione dei settori industriali e del terziario.

Si rileva, infine, che gli SMR ad acqua considerano l'impiego di combustibile di fatto simile a quello attualmente in uso nei reattori attualmente in esercizio. Questa caratteristica da un lato determina la disponibilità di una filiera di fabbricazione già consolidata e disponibile; dall'altro, consente l'estensione agli SMR della comprovata capacità di riprocessare il combustibile al termine del suo impiego in reattore, al fine ultimo di minimizzarne i volumi recuperando materiali potenzialmente impiegabili in alcuni reattori della tipologia AMR (specificamente, quelli operanti a spettro veloce) o, in misura minore, in grandi reattori ad acqua della generazione attuale.

C3-2 Schede AMR

3-2.1 Scheda GFR

I reattori veloci refrigerati a gas (*gas-cooled fast reactor, GFR*) sono caratterizzati dall'impiego di un gas (tipicamente elio) per la refrigerazione. Questa scelta conferisce la possibilità di operare a temperature particolarmente elevate, a vantaggio di una maggior efficienza termodinamica dell'impianto e dell'uso del calore associato per applicazioni industriali, posto che i materiali strutturali impiegati nel nocciolo consentano la necessaria resistenza meccanica. In tali sistemi, infatti, non è pensato l'impiego di grafite, per consentire l'esercizio del nocciolo nel range veloce dello spettro energetico dei neutroni. Così facendo, tali reattori possono combinare la chiusura del ciclo del combustibile alle alte temperature operative.

Per contro, l'assenza di grandi masse di materiali strutturali – richiesta dall'esercizio a spettro veloce – e soprattutto di un refrigerante liquido determina una modesta capacità termica del sistema primario, che rende quindi particolarmente rapidi e violenti i potenziali transitori incidentali. La refrigerazione a gas, inoltre, impone l'esercizio ad alta pressione, esponendo tali reattori ad eventi di perdita del refrigerante. È dunque prassi dei progettisti confidare su un approccio di sicurezza largamente basato sull'impiego di sistemi attivi (in controtendenza rispetto alle pratiche di sicurezza in voga attualmente), oltre che sulle caratteristiche intrinseche del sistema.

Per resistere alle elevate temperature e ai potenziali transitori incidentali, è orientamento comune quello di fare riferimento ad un combustibile in forma di carburo, per il quale non è attualmente disponibile né una filiera di fornitura consolidata, né, in molti casi, una esperienza estensiva in merito, se non presso poche organizzazioni extraeuropee (è il caso dell'India).

Non esistono reattori basati sulla tecnologia GFR, neppure di tipo sperimentale.

3-2.2 Scheda LFR

I reattori veloci refrigerati a piombo (*lead-cooled fast reactor, LFR*) sono caratterizzati dall'impiego di piombo fuso quale refrigerante, operando così nella parte veloce dello spettro neutronico, così da ottimizzare l'uso del combustibile fino a chiuderne l'associato ciclo. L'uso del piombo quale refrigerante conferisce inoltre elevate performance di sicurezza, che portano la quasi totalità degli sviluppatori a vantare la possibilità di ridurre l'estensione della zona di preparazione alle potenziali emergenze associate con un ipotetico incidente, al perimetro del sito dell'impianto.

L'impiego del piombo consente infine di operare il reattore ad elevata temperatura. Per ottenere i benefici derivanti dall'incremento delle temperature operative, è però necessario disporre di materiali avanzati, capaci di resistere all'effetto corrosivo del piombo.

La tecnologia LFR, utilizzando quale refrigerante una lega fra piombo e bismuto, fu sviluppata, testata ed impiegata in ambito militare nell'ex Unione Sovietica per la propulsione di sottomarini nucleari; per tale ragione, però, sono disponibili limitate informazioni di dettaglio sulle soluzioni impiegate per quella applicazione. Attualmente, in Russia, è in fase di realizzazione il primo dimostratore di un impianto LFR a piombo fuso per applicazioni civili.

La più parte dei progetti di reattori LFR fa riferimento all'impiego di combustibile in forma di ossido (di solo uranio, o di uranio e plutonio misti), su cui, anche in Europa, è disponibile una vasta esperienza di fabbricazione ed operativa, nonché evidenze sperimentali della possibilità di ritrattamento di tale combustibile, maturate nell'ambito di progetti relativi ai reattori SFR. Tale combustibile è peraltro affine a quello in uso negli attuali reattori ad acqua, con la differenza (sostanziale per quanto concerne la fabbricazione) di un maggior arricchimento, non contemplato dalle attuali linee produttive – condizione questa determinata in larga parte dall'assenza di reattori veloci in esercizio, al di fuori di Russia, Cina ed India. È utile rilevare, comunque, il piano di *newcleo* che include il dotarsi di una fabbrica per la produzione industriale di combustibile per i propri sistemi LFR, la cui disponibilità è prevista in tempistiche compatibili con il dispiego dei primi reattori commerciali, sfruttando le competenze, ed attingendo ai materiali, disponibili in Francia.

3-2.3 Scheda MSR

Nei reattori a sali fusi (*molten salts reactor, MSR*), diversamente da tutti gli altri, non vi è distinzione fra combustibile e refrigerante, essendo entrambi intimamente combinati nel sale fuso. In questo avviene dunque direttamente la generazione di potenza, rimossa dalla circolazione del medesimo sale all'interno del reattore.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Il panorama dei reattori a sali fusi è estremamente variegato, con una pluralità di concetti tra loro differenti principalmente per quanto concerne lo spettro neutronico (sia veloce che termico) e la scelta del sale (i più comuni dei quali sono fluoruri e cloruri). Esistono anche concetti nei quali il combustibile è mantenuto in una forma più tradizionale (solido, incapsulato in barrette arrangiate a formare il nocciolo), e dove dunque il sale ha solo la funzione di refrigerante, anche se tali concetti sono esclusi dalla presente rassegna. I concetti nei quali il sale funge anche da combustibile, infatti, sono gli unici a consentire di associare il reattore direttamente ad un impianto di riprocessamento in linea, realizzando dunque nella medesima installazione tutte le infrastrutture necessarie a consentire da un lato l'esercizio continuo dell'impianto (senza interruzioni per la ricarica), e dall'altro – laddove il reattore operi a spettro veloce – la chiusura del ciclo di combustibile.

Gli sviluppatori di reattori a sali fusi rivendicano il vantaggio di sicurezza dato dall'impossibilità che avvenga la fusione del nocciolo, essendo il combustibile già in forma liquida. Tale peculiarità, tuttavia, determina l'eliminazione di una delle barriere ingegneristiche che, nei reattori più tradizionali, si interpongono alla potenziale fuoriuscita di materiale radioattivo verso l'esterno. L'apprezzamento del reale vantaggio di sicurezza di questi reattori è, dunque, ancora oggetto di discussioni a livello internazionale.

Relativamente all'esperienza operativa di questi impianti, si registra un unico reattore sperimentale, operato negli Stati Uniti nella seconda metà degli anni '60.

La peculiarità del combustibile in forma di sale liquido, unica per questa sola tecnologia, e l'unicità del reattore sperimentale operato quasi sessant'anni fa, determinano ad oggi l'inesistenza di linee di fabbricazione su scala industriale, nonché la mancanza di una consolidata capacità di ritrattamento dei sali al termine del loro impiego in reattore.

3-2.4 Scheda SCWR

Il reattore pressurizzato ad acqua a pressione superiore a quella critica (SCWR) è l'unico dei sei concetti di Generation IV che fa uso di acqua leggera come refrigerante. Questo rappresenta in linea di massima un vantaggio, perché permette di usufruire dell'esperienza delle filiere di reattori più diffuse e provate tra quelle esistenti. L'uso di acqua a pressione superiore a quella critica elimina in condizioni operative le problematiche legate all'ebollizione, come quelle dovute al raggiungimento del flusso termico critico, e permette di ottenere temperature massime e salti entalpici nel nocciolo che offrono la possibilità di utilizzare minori portate di refrigerante a parità di potenza rispetto ai reattori PWR, insieme a più elevate efficienze del ciclo utilizzatore (ad esempio 44%). Il valore tipico della pressione operativa è di 25 MPa per molti tra i concetti proposti, con temperature

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

di ingresso e uscita dal nocciolo di circa 280 °C e 500 °C, che possono arrivare oltre i 600 °C. Sono stati proposti concetti a "pressure vessel" e a "pressure tubes", sia con flusso neutronico termico che veloce (in quest'ultimo caso, dunque, potenzialmente capaci di chiudere il ciclo del combustibile). L'uso di un BoP a ciclo diretto, come nei BWR, semplifica il layout di impianto, grazie alla eliminazione dei generatori di vapore, permettendo così minori ingombri.

I progetti dei reattori SCWR fanno riferimento ad un combustibile in forma di ossido, analogo (qualora il progetto sia basato sull'esercizio in spettro neutronico termico) o solo simile (nel caso invece di progetti pensati per operare in spettro veloce) a quello oggi impiegato nei reattori commerciali. Nel primo caso, tali sistemi beneficerebbero della disponibilità di una filiera di approvvigionamento matura, mentre nel secondo caso richiederebbero l'approntamento di questa, al pari di altre tecnologie di reattore che necessitino del medesimo tipo di combustibile (quali LFR ed SFR).

Non esistono reattori, commerciali o sperimentali, basati sulla tecnologia SCWR.

3-2.5 Scheda SFR

I reattori veloci refrigerati a sodio (*sodium-cooled fast reactor, SFR*) sono molto simili a quelli LFR, con la differenza principale data dall'impiego di sodio fuso quale refrigerante. Anche i sistemi SFR, infatti, possono operare nella parte veloce dello spettro neutronico, dunque capaci potenzialmente di chiudere il ciclo del combustibile, ed operano a temperature più elevate dei più comuni reattori ad acqua, anche se non sensibilmente più alte per via del limite dato dall'ebollizione del sodio.

L'uso del sodio quale refrigerante introduce però potenziali rischi di sicurezza, dovuti principalmente alla reattività chimica del refrigerante con aria (incendio) ed acqua (esplosione). Ciò impone tipicamente la separazione del circuito primario del reattore dal circuito secondario del vapore per la turbina, mediante l'impiego di un circuito intermedio fra i due.

La tecnologia SFR vanta una rilevante esperienza operativa: i primi reattori sperimentali furono realizzati a partire dagli anni '60, e ancora oggi sono in esercizio reattori sperimentali (in Cina, India e Russia) e persino commerciali (in Russia).

Contestualmente alla costruzione ed esercizio di tali reattori, erano state approntate filiere di fornitura del combustibile – del tipo ad ossidi misti di uranio e plutonio – con un grado di maturità quasi analogo a quello della produzione di combustibile ad ossido per gli attuali reattori commerciali. In alcuni casi, furono anche dimostrate sperimentalmente le capacità di riprocessamento del

combustibile al termine dell'impiego in reattore, e dunque anche la possibilità concreta di pervenire ad una chiusura del ciclo del combustibile. Col termine delle esperienze operative di tali reattori, però, anche le catene di fornitura del combustibile associate sono state dismesse, e lo sviluppo di impianti industriali di ritrattamento interrotto, lasciando a disposizione solamente le competenze derivate da tale esperienza pregressa.

3-2.6 Scheda VHTR

I reattori ad altissima temperatura (*very-high temperature reactor, VHTR*) sono reattori refrigerati a gas (tipicamente elio) capaci di raggiungere temperature così elevate da consentirne l'impiego in settori industriali altrimenti non servibili da altre tecnologie nucleari, quali, ad esempio, la produzione diretta di idrogeno.

A differenza dei sistemi GFR, comunque, prevedono l'uso di grafite come moderatore, operando dunque nella porzione cosiddetta termica dello spettro neutronico, e dunque non potendo realizzare la chiusura del ciclo del combustibile. L'ampio ricorso alla grafite conferisce, per contro, una elevata inerzia termica, di cui beneficiano in potenziali transitori incidentali. La forma speciale del combustibile – TRISO^c – conferisce inoltre una elevatissima capacità di tolleranza alle alte temperature, rendendo estremamente improbabile il danneggiamento del nocciolo anche nelle più severe condizioni incidentali.

L'esercizio ad altissima temperatura li pone come evoluzione dei reattori ad alta temperatura (HTR), che furono testati in diverse nazioni fra gli anni '60 e '80 e dai quali possono trarre, almeno parzialmente, un ritorno di esperienza operativa. A differenza di questi, comunque, per resistere alle più alte temperature necessitano di materiali refrattari, che sono ancora in fase di sviluppo.

Con l'eccezione di poche nazioni, dove sono stati nuovamente installati e sono in esercizio impianti di tipo HTR, non esistono filiere mature per la produzione industriale di combustibile TRISO. Recentemente, però, diverse organizzazioni, di ricerca ed industriali, hanno approntato linee sperimentali o prototipiche, presso le quali è possibile realizzare lotti di combustibile.

C3-3 Scheda MR

La filiera dei micro reattori (MR) comprende un'ampia gamma di proposte tecnologiche accomunate dalla contenuta potenza del sistema (<50 MWth). Si tratta tipicamente di reattori molto compatti che possono essere assemblati anche interamente in fabbrica e, grazie alle dimensioni ridotte, facilmente trasportati su

^c Il combustibile TRISO è costituito da microsfele di uranio incapsulate in barriere ceramiche multiple, e infine immobilizzate in una matrice di grafite a forma di sfera ("pebble") o di blocco prismatico.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

strada o via mare al sito di utilizzo. Questo consente agli MR notevole flessibilità di dispiegamento, potendo essere localizzati anche in aree remote o isolate senza una consolidata infrastruttura energetica.

La compattezza dovrebbe anche rendere il processo di costruzione più rapido ed efficiente, consentendo la messa in opera dei reattori in tempi rapidi e con costi ridotti. Questi elementi, insieme ad una massiccia produzione di serie, sono ritenuti essenziali per far fronte all'impossibilità di valorizzare l'economia di scala (ancora più marcata che nel caso degli SMR ed AMR) al fine di preservare la competitività nelle specifiche applicazioni per le quali tali reattori sono concepiti.

Gli MR sono poi generalmente progettati per garantire versatilità di utilizzo consentendo la produzione di energia elettrica, calore per teleriscaldamento o ad alta temperatura per utilizzi industriali. Data la loro flessibilità, gli MR vengono spesso presentati come una sorgente di energia che ben si complementa con le fonti rinnovabili intermittenti, come l'energia solare e l'energia eolica.

La bassa densità di potenza, lo sfruttamento di caratteristiche intrinseche e l'utilizzo di sistemi di sicurezza passivi sono gli elementi su cui tipicamente si basano i progetti di MR per assicurarne la resilienza nella gestione di eventuali incidenti, puntando – come per altri progetti SMR ed AMR – ad un funzionamento, in condizioni di emergenza, che non necessiti di alimentazione elettrica o di intervento umano per lunghi periodi di tempo.

Gli MR considerati nel presente rapporto fanno tutti riferimento all'impiego di combustibile di tipo TRISO; valgono pertanto le medesime considerazioni già presentate in relazione ai sistemi VHTR. Anche in questo caso è utile riportare come Ultra Safe Nuclear Corporation – casa madre di Ultra Safe Nuclear Italia – si sia dotata di un impianto pilota per la fabbricazione di combustibile TRISO negli Stati Uniti, mentre un impianto di produzione industriale, con capacità di alcune t/mese, è in allestimento in collaborazione con Framatome a Hanford (WA) ed entrerà in funzione in parallelo all'omologazione del combustibile, prevista per il 2027. La Ultra Safe Nuclear Italia sta considerando l'allestimento di un secondo impianto per servire l'Europa.

CAP. 4 - CONTESTO NAZIONALE

C4-1 Utilizzatori

La classe degli utilizzatori include tanto le *utilities*, incaricate di generare energia, potenzialmente adottando le tecnologie di fissione qui discusse, quanto i (grandi) consumatori della medesima energia (sia come elettricità che come calore), che necessitano per questa la stabilità e la certezza del costo di approvvigionamento, anche attraverso la minore dipendenza dalle importazioni di combustibili e materie prime. La prossimità fra tali due gruppi determina una affinità di intenzioni, finalità e necessità, oltre ad un ruolo non solo complementare, ma prospetticamente anche sinergico nello sviluppo del nucleare innovativo in Italia, tramite partnership ed accordi economici anche relativi a possibili schemi di finanziamento congiunto per la realizzazione degli impianti. Si evidenzia un'ottima corrispondenza tra le necessità espresse, da un lato, dai consumatori (domanda), e, dall'altro, la potenziale capacità di soddisfacimento mediante fonte nucleare da parte delle utilities (offerta).

Tra i grandi consumatori possono essere certamente citate le industrie manifatturiere siderurgiche, tra cui il Gruppo Duferco. In Italia oggi la produzione di acciaio avviene principalmente mediante forni elettrici (80%) e in minor misura da altoforno (Taranto); pertanto, il raggiungimento degli obiettivi europei del 2030 pone l'Italia in una posizione di grande vantaggio rispetto agli altri paesi europei che producono il 60% dell'acciaio da altoforno con emissioni pari a circa 2 t di CO₂ per ogni t di acciaio contro le 0,2 t da forno elettrico, dovute principalmente allo Scope 2, cioè dall'energia elettrica prelevata dalla rete nazionale. Per contro, l'alta dipendenza dei costi della produzione dell'acciaio dal costo dell'energia elettrica pone l'Italia in una posizione di debolezza, non potendo contare sulla stabilità e soprattutto sulla competitività del prezzo da pagare per l'approvvigionamento dell'energia elettrica rispetto agli altri paesi europei. Per ridurre le emissioni definite nello Scope 2, le industrie siderurgiche nazionali vedono nel nucleare una scelta irrinunciabile, considerando anche la necessità di dover disporre 24h/24h di energia elettrica decarbonizzata a prezzi allineati con gli altri operatori europei del settore. Per quanto riguarda la catena di lavorazione dei semilavorati, questa necessita di forni ad alte temperature, oggi alimentati esclusivamente a gas naturale. Per questi processi industriali la decarbonizzazione è molto problematica, e le industrie siderurgiche considerano molto interessante la soluzione di fornire calore ad alta temperatura ai suddetti forni con reattori nucleari di tipo AMR o MR capaci di operare a tali temperature, o a valori prossimi a queste. Le necessità delle industrie "energivore", in ultima analisi, si possono ricondurre alla disponibilità di energia elettrica a costi sostenibili, stabili, ed a zero emissioni di CO₂; in alcuni casi, c'è anche l'esigenza di disporre di calore a temperature medio-alte, sempre con il requisito di ridurre o annullare le emissioni di gas serra; calore che può essere

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

fornito da impianti nucleari in parte direttamente e in parte tramite idrogeno prodotto dalle stesse centrali nucleari. Tali industrie considerano il nucleare come adatto a rispondere appieno a queste necessità. FEDERACCIAI ed Ansaldo Nucleare hanno avviato un'esplorazione circa la possibilità di importare già da subito, da paesi produttori confinanti, energia nucleare a prezzi concordati, a fronte di una disponibilità a co-finanziare la costruzione di nuovi impianti. Da notare che una tale iniziativa consentirebbe qualche beneficio già per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione al 2030.

Il punto di vista delle utilities, come detto, è complementare e sinergico a quello dei consumatori, infatti viene ritenuto cruciale abilitare nel minor tempo possibile lo sviluppo del nuovo nucleare in Italia, a partire dalle prime nuove tecnologie che saranno commercialmente disponibili. Gli obiettivi da perseguire, dal punto di vista delle utilities, sono la decarbonizzazione a prezzi totali (costo di produzione, remunerazione degli investimenti ed oneri di sistema) competitivi per i clienti finali, la continuità degli approvvigionamenti, la stabilità e l'adeguatezza della rete elettrica e la possibilità di fornire calore ed idrogeno ai settori industriale e terziario. Per tutti questi fattori, il nuovo nucleare viene visto come fondamentale ed irrinunciabile. Le utilities mettono anche in piena evidenza come una fonte programmabile, senza emissioni di CO₂, consenta anche un più efficiente sviluppo delle energie rinnovabili non programmabili. Tra le grandi utilities coinvolte, Edison intende contribuire alla decarbonizzazione del sistema elettrico nazionale attraverso la progressiva sostituzione delle centrali termoelettriche alimentate a gas, che arriveranno a fine vita utile nei prossimi anni, con centrali nucleari di nuova generazione; l'ambizione è di realizzare due centrali di tipo SMR entro il 2040, facendo leva sulla supply chain nucleare italiana (essendo già stati firmati accordi preliminari che vedono coinvolti Edison, Ansaldo Nucleare ed EdF) e possibilmente in partnership con i consumatori finali e/o altri operatori nazionali. Inoltre, attraverso lo sviluppo del nuovo nucleare, Edison punta a supportare i clienti industriali nel percorso di decarbonizzazione del fabbisogno energetico, sia elettrico che termico. Edison può attingere al know-how maturato da una lunga esperienza a livello europeo ed internazionale nel campo della fissione nucleare derivante dalle storiche attività e competenze del Gruppo EdF, di cui l'azienda fa parte. Il Gruppo EdF si è attivato per stringere importanti accordi strategici ed intese preliminari, con società e stakeholder nazionali (quali gli accordi che vedono coinvolti EdF, Ansaldo Energia, Ansaldo Nucleare, AIN - Associazione Nucleare Italiana - e GIFEN - l'associazione delle industrie nucleari francesi) e internazionali, per lo sviluppo e la realizzazione di nuovi impianti SMR basati sulla tecnologia Nuward. Il Gruppo ENEL può vantare importanti competenze nel settore nucleare che derivano dall'esercizio di sei impianti in Spagna, e dalla partecipazione come Owner & Architect Engineer in Slovacchia. Recentemente ENEL ha siglato accordi con società italiane di progettazione e costruzione (Ansaldo Nucleare [REDACTED]), ed ha creato una nuova unità organizzativa interna denominata Nuclear Innovation

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

con lo scopo di costruire un centro di competenze qualificato per presiedere le attività del settore nucleare. Anche nell'ottica di ENEL, impianti di nuova tecnologia quali SMR ed AMR consentirebbero una diversificazione della propria offerta energetica, con maggiore possibilità di penetrazione nel segmento dei servizi all'industria (sia elettricità che calore di processo), in quello delle utenze residenziali (elettricità e teleriscaldamento), e nel supporto alla rete elettrica (servizi combinati di flessibilità e base-load). Tutti questi aspetti abilitati dal nuovo nucleare sono anche ritenuti fondamentali per un sostegno efficace alla penetrazione delle rinnovabili. Fattore importante sono i tempi di deployment offerti da reattori di tipo SMR ed AMR, ovvero più ridotti rispetto alle centrali di grande taglia. Il contributo del nucleare alla decarbonizzazione viene visto favorevolmente non solo per l'elettricità direttamente prodotta, ma anche per il calore per uso industriale e per la generazione di idrogeno "rosa" (per i settori "Hard to Abate").

C4-2 Ingegneria dei Sistemi Nucleari Innovativi

Alcune aziende italiane offrono, al sistema paese, capacità ed esperienza nel settore dell'ingegneria applicata in ambito nucleare. Nel panorama nazionale, si distinguono in particolare due classi di aziende, in ragione del loro ruolo nella catena dei servizi di ingegneria.

Da un lato, le aziende che si propongono in qualità di architetto generale per il progetto, la fornitura e la costruzione (*engineering, procurement and construction, EPC*) di un intero impianto nucleare, o di alcuni dei sistemi che lo compongono; dall'altro, le aziende che forniscono i propri servizi limitatamente alle fasi di analisi e progettazione, applicate anche ai medesimi sistemi.

Le aziende che afferiscono alla categoria degli architetti generali sono quelle che coprono il più ampio spettro nella catena dei servizi. Fra queste, quelle che si propongono in tal ruolo relativamente all'intero impianto sono Ansaldo Nucleare – attore storico del settore – e la più recente *newcleo*, ciascuna relativamente al proprio concetto di reattore AMR della filiera LFR. La capacità di queste aziende si concretizza nella possibilità di affrontare la progettazione in tutte le aree dell'ingegneria, dal processo alla meccanica, dal civile all'elettrica e alla radioprotezione. In materia specificamente nucleare, per la progettazione ed analisi di nocciolo, entrambe si avvalgono di collaborazioni dedicate con ENEA, che mantiene questa competenza nel panorama nazionale.

Nel caso di Ansaldo Nucleare, l'appartenenza al gruppo Ansaldo Energia comporta inoltre la possibilità di complementare le capacità di architetto generale con quella di fornitura di componenti critici. Da rilevare che Ansaldo Nucleare, anche a valle dell'abbandono dei programmi di nuove centrali in Italia, ha continuato a svolgere il ruolo di EPC contractor (in partenariato con la canadese AECL) per interi impianti (due unità CANDU in Romania).

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

L'aspetto più rilevante dell'esperienza di EPC contractor sta nel ruolo di responsabilità associato ai contratti: in molti casi, tale responsabilità si è tradotta anche nella gestione e nel coordinamento di un molto più vasto insieme di aziende italiane, ciascuna coinvolta secondo le proprie competenze e capacità (una disamina delle quali sarà presentata nella sezione seguente), attraverso partnership mirate, costruite sulla base di collaborazioni consolidate o di volta in volta stabilite in ragione delle necessità specifiche associate al contratto in questione.

Alle due aziende italiane sopra citate, è rilevante affiancare anche Edison, Mangiarotti ed Ultra Safe Nuclear Italia: pur non avendo, nessuna di queste, specificamente il ruolo di architetto generale sopra citato, ciascuna è però parte di un più ampio gruppo internazionale al quale afferiscono anche società (tutte estere) capaci di adempiere a tale ruolo. Nello specifico, Edison può vantare le competenze della francese EdF; Mangiarotti quelle della statunitense Westinghouse, mentre Ultra Safe Nuclear Italia quelle della casa madre Ultra Safe Nuclear Corporation, negli Stati Uniti.

Sempre col ruolo di architetto generale, ma limitatamente a specifici sistemi che compongono un impianto nel suo complesso, si rilevano anche RINA e Demont, che analogamente ad Ansaldo Nucleare hanno svolto il proprio ruolo contribuendo alla realizzazione o all'ammodernamento di impianti nucleari esistenti ed in diverse parti del mondo, inclusa la centrale XXXXXXXXXX, in Slovacchia, XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX. Essendo relative ad impianti nucleari esistenti, tutte le esperienze delle tre aziende sopra citate sono state espresse relativamente ad impianti della tecnologia ad acqua (leggera o pesante, in pressione o bollente). L'unica eccezione ragguardevole è quella vantata da Ansaldo Nucleare, che ha contribuito alla progettazione, fornitura e realizzazione di una parte consistente del reattore francese Superphénix, della filiera SFR.

A complementare il panorama delle aziende sopra descritte, si riportano le capacità di ingegneria, unite ad una pregressa esperienza in campo nucleare, che ulteriori aziende italiane possiedono. È il caso, tra i membri del GdL 2, di società quali NIER ed SRS, che hanno supportato aziende coinvolte in ruoli di EPC o gestione, fornendo competenze mirate all'esecuzione di analisi, valutazioni o progettazione di specifici componenti e sistemi, tanto in autonomia, quanto integrando squadre di ingegneria direttamente presso le aziende commissionarie. Tra le esperienze più rilevanti maturate da queste aziende, si ritiene utile citare gli studi di affidabilità di componenti e sistemi, svolta da NIER anche per reattori di tecnologia diversa da quella ad acqua, nonché la progettazione multidisciplinare e la fornitura, da parte di SRS, di svariate installazioni sperimentali necessarie alla ricerca, sviluppo e qualifica relative a tecnologia e componenti per sistemi soprattutto, e non solo, LFR; in quest'ultimo caso, SRS avvalendosi – similmente alle aziende con ruolo di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

architetto generale – di una platea di fornitori, coinvolti attivamente nello sviluppo prima ancora che nella fornitura vera e propria.

Proprio questa caratteristica – la creazione dinamica, e nel tempo il consolidamento, di partnership fra molteplici aziende manifatturiere insieme alle aziende di ingegneria – assume, nella prospettiva di una possibile futura realizzazione di impianti nucleari sul suolo nazionale, un ruolo strategico per il paese. Ruolo che è al tempo stesso percepito dalle medesime aziende di ingegneria come una preziosa opportunità, laddove il rafforzamento delle capacità di tutte le aziende capaci di operare nel settore nucleare da un lato, e l'estensione di tali partnership dall'altro, consentirebbero al sistema industriale italiano di rispondere in misura ancora più sostanziale alle necessità associate alla realizzazione ed esercizio di un impianto nucleare.

C4-3 Catena di Fornitura

A livello nazionale sono presenti diverse società che operano nella supply-chain attraverso la fornitura di prodotti, componenti e servizi per impianti nucleari. Relativamente alle grandi centrali, si va dalla realizzazione di forgiati in acciaio destinati al pressurizzatore e generatore di vapore di impianti tipo EPR e CPR1000 (ARVEDI – Acciai Speciali Terni), a forgiati di alta qualità per le centrali francesi (Tectubi Raccordi e IBF), a quello di componenti per la centrale inglese EPR di Hinkley Point C (Belleli Energy CPE, Walter Tosto), all'ingegnerizzazione di cask di ultima generazione per il trasporto di combustibile esaurito (ATB Riva Calzoni), alla qualifica di contenitori destinati al contenimento dei rifiuti radioattivi (RINA), al refurbishment della centrale romena di Cernavoda (Walter Tosto) e ai lavori apportati per estendere la vita operativa della centrale di Krsko in Slovenia (Ansaldo Nucleare). Sono altresì disponibili capacità realizzative per componenti critici a pressione (SIMIC), impianti di raffreddamento/condizionamento, sistemi di ventilazione e torri di raffreddamento (Demont) e la fornitura di servizi di ingegneria per i sistemi ausiliari e di verifiche onsite (RINA). L'industria italiana è da anni impegnata nella progettazione e realizzazione all'estero di impianti nucleari di grande taglia tipo PHWR e AP1000 (Ansaldo Nucleare). Sempre per il reattore AP1000, consolidata è l'esperienza nella fabbricazione di scambiatori di calore, pressurizzatori, accumulatori, così pure di generatori di vapore per centrali nucleari del mercato francese e americano (Mangiarotti – Westinghouse Italia). Infine, sono disponibili servizi nel campo della gestione dei rifiuti radioattivi, nel decommissioning delle installazioni nucleari e nelle attività di decontaminazione e bonifica (Nucleco).

Oltre agli impianti di grossa taglia, esistono a livello nazionale potenzialità realizzative per i componenti più grandi e critici degli SMR, come il Metallic Containment Vessel (ATB Riva Calzoni) e generatori di vapore (Mangiarotti –

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Westinghouse Italia). Ansaldo Nucleare ha stabilito accordi con EDF e la sua controllata Nuward per lo sviluppo di componenti dell'isola nucleare e del BOP e, tramite la sua controllata inglese, per il Rolls Royce SMR, attualmente in fase di licensing nel Regno Unito. Per quanto riguarda Nuward, l'accordo prevede che Ansaldo Nucleare partecipi sia in qualità di fornitore strategico di sistemi e componenti, sia in qualità di coordinatore/integratore di una supply chain italiana. Sempre Ansaldo Nucleare è impegnata con GE-Hitachi sul progetto BWRX-300 e con Rolls Royce SMR per la progettazione di una facility sperimentale per test integrali, la fornitura di core simulator e dei principali componenti in pressione (in collaborazione con SIET).

La società *newcleo*, con le acquisizioni delle società SRS, Fucina e Rüttschi (già supplier di pompe per EDF e per altri clienti operanti in campo nucleare) è interessata a fornire componenti per gli SMR ad acqua.

Uno studio condotto nel 2023 da Politecnico di Milano ed Ansaldo Nucleare ha identificato 25 aziende italiane in grado di contribuire sensibilmente alla supply chain per reattori SMR; un'analisi ulteriore, sviluppata assieme alle aziende suddette, ha anche mostrato come il sistema industriale nazionale possa contribuire alla realizzazione di almeno 8 contenitori in pressione per reattori SMR all'anno.

Relativamente alla filiera degli AMR, *newcleo* sta progettando una fabbrica per la produzione di combustibile MOX per reattori veloci, che intende realizzare in Francia, e ha in corso una collaborazione con Walter Tosto per valutare la capacità di quest'ultima a fornire componenti critici per il sistema LFR che sta sviluppando.

Una collaborazione è in corso fra Walter Tosto e il consorzio FALCON, costituito da Ansaldo Nucleare, ENEA e l'ente romeno di ricerca RATEN, per lo studio di fattibilità del reattore ALFRED, dimostratore della tecnologia LFR. XXXXXXXXXXXXXXXXXX sta valutando con Ansaldo Nucleare ed i laboratori nazionali di Belgio (SCK CEN), Italia (ENEA) e Romania (RATEN) la formazione di un consorzio internazionale finalizzato allo sviluppo e successiva commercializzazione di un LFR.

Per quanto riguarda la filiera degli MR, la società SIMIC ha un accordo di collaborazione, tramite la controllata Ultra Safe Nuclear Italia, con la statunitense USNC (Ultra Safe Nuclear Co.) per la produzione e l'assemblaggio, presso le officine SIMIC di Marghera (VE), dei principali componenti di processo del reattore proposto dall'azienda americana. Infine, l'eventuale realizzazione in Europa del MR della Westinghouse, eVinci, vede la Mangiarotti società di riferimento per quanto riguarda la supply chain.

Degno di nota infine è stato anche l'emergere di una ampia esigenza e di una forte attesa da parte di molti partecipanti per l'avvio di un programma di sostegno allo

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

sviluppo delle filiere prioritarie selezionate, che permetta di sostenere e rafforzare il tessuto industriale operante nell'ingegneria e nella fornitura.

C4-4 Ricerca, Sviluppo e Formazione

Il panorama del mondo della ricerca, sviluppo e formazione nel settore nucleare nazionale è per sua natura intrinsecamente connesso e direttamente legato al relativo tessuto industriale. Va infatti considerato l'alto contenuto scientifico e tecnologico del settore, che spinge le università a collaborare con i centri di ricerca del territorio per dare forza alla loro missione di ricerca, professionalizzazione dei giovani esperti di settore ed il relativo sviluppo di competenze. L'obiettivo finale è infatti trasferire queste competenze alla filiera produttiva, in modo da incrementarne il valore tecnologico e la competitività nel panorama internazionale.

L'importanza del mantenimento di competenze nucleari e la relativa trasmissione alle future generazioni ha spinto le università con programmi dedicati all'ingegneria nucleare a conglobarsi nel Consorzio Interuniversitario per la Ricerca Tecnologica Nucleare (CIRTEN). I politecnici di Milano e Torino insieme alle università di Bologna, Padova, Palermo, Pisa e Roma "La Sapienza" hanno sfruttato le sinergiche competenze nel campo nucleare per fare massa critica e rafforzare la partecipazione a svariati programmi di ricerca nazionali ed internazionali. Tra i principali si citano il coinvolgimento del CIRTEN nella "Ricerca di Sistema Elettrico" dove, all'interno del filone dedicato all'energia nucleare da fissione, si è occupato di svariate attività di calcolo e modellistica a supporto dello sviluppo di sistemi SMR e AMR, con particolare riguardo, per questi ultimi, per i sistemi LFR. Similmente, in progetti internazionali finanziati dalla Commissione Europea, dall'IAEA dell'ONU e dalla NEA dell'OCSE, ha svolto attività di ricerca a supporto dei sistemi nucleari innovativi ed in particolare SMR, LFR e MSR. Infine, attraverso la partecipazione alla Collaborazione Europea per la Formazione Nucleare (*European Nuclear Education Network, ENEN*), insieme alle principali organizzazioni del settore a livello europeo, ha contribuito alla preservazione e all'ulteriore sviluppo delle competenze nei settori nucleari attraverso l'istruzione superiore e la formazione.

Similmente, nelle università, i dipartimenti di fisica interessati ai temi nucleari applicati, tra cui si citano ad esempio le università Milano Bicocca e di Bari, hanno mantenuto – anche sfruttando la naturale collaborazione con l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) – alcune linee di attività a supporto dei reattori nucleari di ricerca sul territorio (es. il reattore TRIGA del Laboratorio Energia Nucleare Applicata a Pavia) e sulla gestione dei rifiuti radioattivi, in particolare sulla relativa sensoristica.

RSE contribuisce, assieme ad ENEA, alle Università e agli altri player nazionali, alla ricostruzione di una capacità tecnica, autorizzativa, gestionale e di controllo per le

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

nuove centrali nucleari realizzabili in Italia, e svolge studi e simulazioni sugli scenari energetici, inclusa l'ipotesi di una ripresa dell'uso della fonte nucleare.

RSE ha supportato, in passato, le istituzioni pubbliche attraverso lo sviluppo di competenze nel campo della sicurezza nucleare, della qualifica dei componenti, dell'impatto sulla rete elettrica. Con riferimento allo sviluppo dei reattori di IV Generazione, RSE ha avuto un ruolo attivo grazie alla partecipazione a numerosi programmi europei di ricerca.

Per la parte di ricerca più spiccatamente sperimentale l'azienda SIET, partecipata ENEA, svolge un ruolo di punta. Ha svolto test in scala rilevante a supporto della qualifica di componenti cardine, con l'ausilio delle sue numerose infrastrutture sperimentali, tra cui si cita l'impianto Simulatore Pressurizzato per Esperienze di Sicurezza, un unicum a livello mondiale per dimensioni e potenza. Tra le collaborazioni ed i lavori più rilevanti si citano i test per la qualifica del generatore di vapore per il progetto di SMR dell'azienda americana NuScale Power e gli esperimenti sugli innovativi sistemi di sicurezza passivi dell'SMR AP600 dell'americana Westinghouse per verificarne l'efficacia e consentirne il licensing da parte dell'ente regolatore americano. SIET è anche coinvolta nello sviluppo di sistemi LFR, dove ha messo a disposizione le sue infrastrutture per test su generatori di vapore innovativi e sistemi di sicurezza passivi auto-regolanti pensati per il dimostratore europeo della filiera, ALFRED.

Anche RINA ha negli anni mantenuto una linea di competenza specifica sui materiali per il nucleare, fornendo assistenza tecnica ad aziende e partecipando a progetti collaborativi inerenti la messa a punto di materiali resistenti alle condizioni critiche di corrosione a contatto con metallo liquido o sali fusi e partecipando alla progettazione di sistemi e componenti per apparati sperimentali dedicati.

L'ENEA, infine, che ha storicamente agito da collante nazionale per il tessuto della ricerca e sviluppo in ambito nucleare, ha contribuito all'avanzamento di sistemi SMR e AMR, sia con attività di progettazione che con relativo sviluppo tecnologico e sperimentazione a supporto. Nell'ambito degli AMR la più parte degli sforzi dell'ente degli ultimi 30 anni è stata rivolta ai sistemi LFR dove l'Italia ha un ruolo centrale fra i paesi occidentali. Dai primi studi sull'Amplificatore di Energia agli sviluppi europei degli Accelerator Driven System (ADS), da una idea di Carlo Rubbia, alle molteplici attività di collaborazione in ambito UE sui metalli liquidi e a quelle nazionali (programmi TRASCO – Trasmutazione Scorie I, II, e III), ENEA ha sempre assunto la funzione di polo per la ricerca applicata e spesso ha coordinato e indirizzato le attività di ricerca e sviluppo europee e nazionali.

Forti, inoltre, sono state negli anni passati le interazioni dirette con i laboratori Europei ed extra-Europei (US, Cina, Corea, Russia) attraverso le collaborazioni su

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

piattaforme tecnologiche e forum internazionali. ENEA continua a mantenere anche oggi scambi con le principali realtà internazionali ed Europee.

Per questo l'Italia, con l'ENEA come principale riferimento, è riconosciuta a livello internazionale come un leader nel campo della ricerca e sviluppo della tecnologia del piombo e delle sue leghe per uso energetico, se non il paese occidentale in cui lo sviluppo della tecnologia del piombo come refrigerante è più avanzato. Le competenze maturate in seno a progetti nazionali ed in numerosi impegni internazionali hanno inoltre portato a svariate collaborazioni con i maggiori attori industriali a livello nazionale e mondiale come Ansaldo Nucleare, *newcleo* e Westinghouse e i maggiori player mondiali come la Cina. Nel contesto degli SMR l'ENEA è pesantemente coinvolta, da almeno venti anni e tra i primi enti di ricerca in Europa, nelle relative tematiche di sicurezza, anche con ruoli di coordinamento, in attività promosse dalla Commissione Europea legate a sistemi di sicurezza passivi e alla modellistica necessaria per analisi incidentali. Al fine di svolgere tale attività l'ENEA collabora con i principali enti di ricerca internazionali ed in particolare con le Organizzazioni Tecniche per la Sicurezza^d (*Technical Safety Organizations, TSO*) europee all'interno della Rete Europea delle TSO (*European TSO Network, ETSON*). con l'obiettivo di armonizzare le metodologie per le analisi di sicurezza.

Come accennato nel Cap. 2 -, l'ENEA rappresenta il paese in molti tavoli di lavoro internazionali della IAEA e della NEA, oltre al ruolo di vice-chair, per la parte relativa alla filiera LFR nel Generation IV International Forum e la partecipazione alla SNETP.

Considerato il progresso appena delineato, l'interesse del mondo della ricerca e formazione nell'avvio di un programma nucleare nazionale è quindi principalmente dovuto al vigore che ne deriverebbe sulle attività di ricerca in essere. La possibilità di rafforzare il legame con il tessuto industriale del paese, sia a livello di formazione specifica della forza lavoro che a livello di ricerca e trasferimento tecnologico, sono inoltre considerati asset strategici per poter mettere a frutto ed ampliare il presidio di competenze mantenuto nel tempo.

C4-5 Considerazioni Generali

La "Parte 2 – Approfondimento" del Questionario sulle tecnologie avanzate di fissione, distribuito ai partecipanti al GdL 2 elencati nella sezione C1-3, constava di un formulario teso a valutare il peso attribuito ad alcune caratteristiche proprie di un futuro impianto nucleare di possibile realizzazione in Italia.

^d Le TSO hanno il compito di fornire competenze tecniche affidabili ed imparziali all'organismo di regolamentazione nucleare del rispettivo paese.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Per valutare le caratteristiche elencate nel questionario, raggruppate in diverse categorie (Economicità, Fattibilità, Innovazione, Operabilità, Sicurezza, Sostenibilità ecc.), si poteva utilizzare uno schema di giudizio così articolato:

- Essenziale/Strategico
- Molto rilevante
- Abbastanza rilevante
- Poco rilevante
- Non rilevante

Il questionario era strutturato per accogliere anche suggerimenti non inclusi nella lista iniziale. I questionari compilati e restituiti sono stati in totale 27.

Nella tabella seguente sono riportati i partecipanti che hanno rimesso il questionario compilato, mentre nella Figura 2 sono riportati gli specifici giudizi di merito raggruppati in funzione delle singole caratteristiche.

Tabella 2. Elenco dei membri del GdL 2 che hanno risposto al questionario di indagine

Ansaldo Nucleare S.p.A.	<i>newcleo</i> S.p.A.
ARVEDI Acciai Speciali Terni S.p.A.	NIER Ingegneria S.p.A. Società Benefit
ATB Riva Calzoni S.p.A.	Nucleco S.p.A.
Belleli Energy CPE S.r.l.	Politecnico di Milano
CIRTEN	S.R.S. Servizi di Ricerche e Sviluppo S.r.l.
Demont S.r.l.	SIMIC S.p.A.
DUFERCO Engineering S.p.A.	SIET S.p.A.
Edison S.p.A.	Ultra Safe Nuclear Italia S.r.l.
ENEL S.p.A.	Università di Milano Bicocca
Fincantieri S.p.A.	Università di Pisa
RINA	Università di Roma La Sapienza
INFN	Walter Tosto S.p.A.
Mangiarotti S.p.A.	X-nano S.r.l.
MERSEN Italia S.p.A.	

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

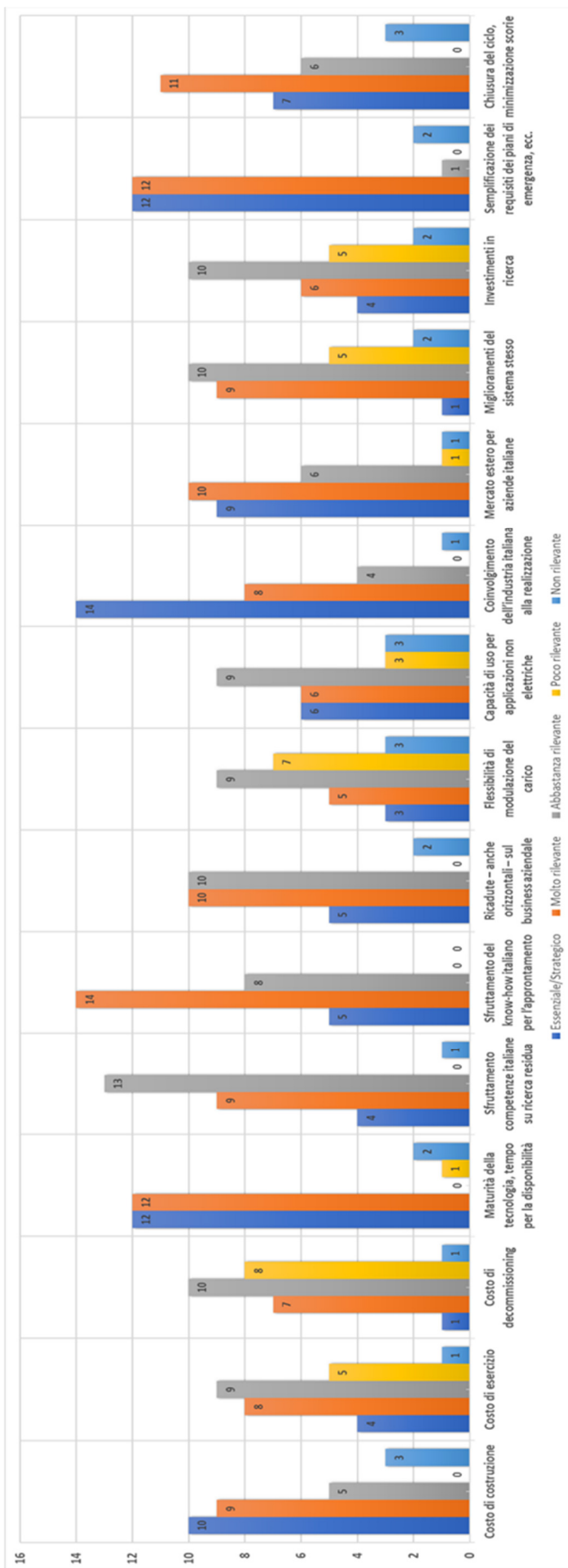


Figura 2. Distribuzione delle risposte degli intervistati per grado di rilevanza, relativamente agli attributi di un potenziale impianto nucleare in Italia.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Da una analisi degli interessi espressi si possono evincere alcune indicazioni rilevanti.

Considerando l'espressione di un giudizio "essenziale/strategico" o "molto rilevante" come una valutazione di alta rilevanza, possiamo effettuare una prima analisi dell'importanza che il singolo parametro riveste per i partecipanti al gruppo di lavoro.

Valutando quindi l'andamento di valore emerge con chiarezza come più dell'80% degli intervistati abbia indicato di alta rilevanza le seguenti caratteristiche:

- maturità delle tecnologie e tempi per la sua disponibilità;
- semplificazione dei piani di emergenza;
- coinvolgimento dell'industria italiana nella realizzazione.

Proseguendo per questa via e considerando una rilevanza medio-alta quella compresa fra il 60 e l'80% si possono identificare i seguenti requisiti:

- costo di costruzione;
- mercato estero per le aziende italiane;
- sfruttamento del know-how italiano per l'approntamento;
- chiusura del ciclo/ottimizzazione delle scorie.

Fra il 50 ed il 60% delle segnalazioni abbiamo:

- ricadute – anche orizzontali – sul business aziendale.

Fra il 30 ed il 50% delle segnalazioni troviamo invece:

- sfruttamento delle competenze italiane su ricerca residua;
- capacità di uso per applicazioni non elettriche;
- costo di esercizio;
- investimenti in ricerca;
- miglioramento del sistema stesso.

Volendo un ulteriore dato di confronto e complemento per la rilevanza complessiva delle caratteristiche, si può estendere la medesima analisi includendo assieme non solo i giudizi "essenziale/strategico" e "molto rilevante" ma anche "abbastanza rilevante", così da evidenziare uno stato complessivamente rilevante per il parametro.

Da qui e limitandosi a quelli che hanno raccolto almeno l'80% delle indicazioni, si può osservare l'ordine riassunto in Tabella 3.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Tabella 3. Elenco delle caratteristiche e dei sottostanti principi emersi come più rilevanti dall'analisi delle risposte al questionario sottoposto ai membri del GdL 2

Caratteristiche	Principi rilevanti
<ul style="list-style-type: none"> - sfruttamento del know-how italiano per l'approntamento (100%); - coinvolgimento dell'industria italiana alla realizzazione (96,3%); - sfruttamento delle competenze italiane per la ricerca residua (96,3%); - ricadute – anche orizzontali – sul business aziendale (92,6%); - mercato estero per aziende italiane (92,6%); 	<p>Valorizzazione competenze italiane</p>
<ul style="list-style-type: none"> - semplificazione dei requisiti dei piani di emergenza (92,6%); - chiusura del ciclo e minimizzazione delle scorie (88,9%); 	<p>Accettabilità (sostenibilità, sicurezza)</p>
<ul style="list-style-type: none"> - costo di costruzione (88,9%); 	<p>Costo della tecnologia</p>
<ul style="list-style-type: none"> - maturità della tecnologia e tempo per la disponibilità (88,9%); 	<p>Tempi di avvio produzione di energia</p>

Ciò conferma ulteriormente il set di caratteristiche già individuate ma indica anche un più complessivo dominio a cui estendere il concetto di rilevanza nelle sue tre declinazioni.

Pur non costituendo quest'analisi una mera media aritmetica per singola caratteristica, che per altro potrebbe risultare non del tutto applicabile e significativa nel caso specifico, tutto ciò permette di individuare con limpidezza un trend dominante fra le caratteristiche da attribuire ad un futuro impianto nucleare da installare in Italia sulla base delle valutazioni dei partecipanti al GdL 2.

Da quanto visto, infatti, emerge che la celerità nel disporre della tecnologia e del reattore, i cui tempi debbono essere comunque compatibili con l'intervallo 2030-2050, è una delle prime preoccupazioni, assieme alla semplificazione dei requisiti dei piani di sicurezza, indice questo, in un panorama quale quello italiano, delle molteplici attese per i vantaggi ambientali di questa tecnologia. Cosa per altro confermata dal valore di alto interesse attribuito alla voce di chiusura del ciclo e ottimizzazione delle scorie.

È doveroso anche sottolineare in maniera marcata come dai questionari emerga con chiarezza l'aspetto cruciale del coinvolgimento dell'industria italiana nel futuro sviluppo di impianti nucleari in Italia, aspetto che è considerato una delle priorità più alte in assoluto, peraltro rafforzata da un'attesa importante per lo sfruttamento

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

del know-how italiano e per l'apertura di mercati esteri per le aziende nazionali che partecipano a questo sforzo. A riprova indiretta di ciò, si può notare che lo "sfruttamento del know-how italiano per l'approntamento" è l'unico indicatore per il quale non sono state registrate indicazioni di rilevanza bassa o nulla.

Sembrano altresì importanti, ma non così determinanti come le specificità precedenti, i costi di esercizio, la capacità di applicazioni non elettriche e i miglioramenti di sistema. Ciò lascia intendere un interesse principalmente rivolto verso l'uso di queste tecnologie come elementi programmabili di adeguatezza e di regolazione del sistema elettrico in accoppiata con la penetrazione delle rinnovabili.

Appare anche significativo da un punto di vista della rilevanza complessiva l'andamento del parametro "sfruttamento competenze italiane per la ricerca residua" che pur non essendo ritenuto frequentemente "essenziale/strategico" gode però di una rilevanza complessiva assai elevata.

Certamente ciò è da ascrivere al rilevante valore attribuito all'impiego delle capacità italiane, non solo per le fasi realizzative ma anche di ricerca e sviluppo, richieste per portare a maturità tutte le tecnologie qui considerate; il parametro richiamato pare essere percepito come una potenziale opportunità per il sistema nazionale.

Questo sembra suggerire come le capacità di ricerca e sviluppo italiane possano essere avvertite come fortemente legate alla capacità di promuovere il coinvolgimento dell'industria, quando impiegate in sinergia con questa, e complessivamente a favorire il proficuo impiego e la valorizzazione del know-how italiano.

Più in generale, dagli interessi esposti nella prospettiva di una ripresa di attività dell'intero settore nazionale sul nuovo nucleare sostenibile emerge una chiara indicazione a procedere per tappe, ponendo in sequenza temporale le tecnologie sulla base della loro maturità tecnologica misurata della produzione di filiera.

Gli interessi mostrati rispecchiano, inoltre, la rilevanza attribuita a quelle tecnologie capaci di offrire soluzioni che introducono miglioramenti nella sicurezza apprezzabili dall'opinione pubblica: molte aziende ed enti di ricerca nazionali vantano infatti un'esperienza consolidata nello studio, sviluppo e prototipazione di dispositivi e sistemi avanzati di sicurezza, che potrebbero trovare diretta applicazione nei sistemi selezionati per l'implementazione.

Prendendo le mosse dalle indicazioni recepite dai membri del GdL 2, ed analizzando da un lato lo stato e le caratteristiche delle diverse tecnologie di reattori avanzati discusse nel capitolo Cap. 3 -, e dall'altro il grado di

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

coinvolgimento del sistema italiano su ciascuna di queste, come emerso dai questionari e riassunto nelle precedenti sezioni del presente capitolo, si può evincere quanto segue:

- la filiera degli SMR ad acqua leggera, forte delle marcate affinità tecnologiche con i reattori attualmente in esercizio e costruzione, è quella che più rapidamente può traguardare la realizzazione; è anche una tecnologia sulla quale, grazie alle attività in essere dell'industria nazionale in collaborazioni internazionali, è particolarmente elevato il potenziale grado di coinvolgimento in un programma di impiego in Italia e all'estero;
- le filiere GFR, MSR ed SCWR della classe AMR risultano tutte ad un grado di maturità tecnologica che non pare allo stato compatibile con il tragarne la realizzazione all'orizzonte contemplato da questo studio;
- per quanto concerne le filiere SFR e VHTR, entrambe con sufficiente grado di maturità da poter essere dispiegate nei tempi di interesse, sono riscontrabili caratteristiche opposte: la prima vanta un'ampia esperienza delle aziende italiane, ed ha la capacità di operare chiudendo il ciclo del combustibile, mentre la seconda vanta performance di sicurezza superiori rispetto all'uso del sodio allo stato liquido e la capacità di fornire calore di processo a temperature più elevate. In ogni caso, nessuna delle due pare soddisfare tutte le caratteristiche individuate come rilevanti dai membri del GdL 2 mostrando inoltre gli SFR temi di pubblica accettabilità più evidenti;
- la filiera LFR presenta caratteristiche tali da consentire la chiusura del ciclo del combustibile e alte performance di sicurezza fra quelle riconosciute agli AMR. Oltre a ciò, larga parte del sistema italiano ha esperienza diretta su tale tecnologia, ivi incluse ricerca, progettazione e fornitura di componenti e sistemi prototipali: questa caratteristica potrebbe rappresentare un elemento esemplare per coniugare il coinvolgimento del sistema italiano già dalle fasi di ricerca e fino all'approntamento. Tali elementi sono molto significativi per una filiera tecnologica che probabilmente avrà tempi di dispiegamento superiori alle linee SMR più affini ai reattori oggi in esercizio ma che comunque ben si posiziona all'interno dell'orizzonte temporale di interesse;
- la filiera MR qui analizzata, basata sulla tecnologia HTR, potrebbe giungere a maturità in modo da consentire la realizzazione di unità nella finestra temporale di interesse; nonostante il modesto grado di coinvolgimento dell'industria italiana, la filiera suscita un potenziale interesse per le capacità applicative peculiari di questi sistemi.

Tutto questo considerato, alla luce del grado di maturità e delle collaborazioni internazionali in atto, considerato il ruolo delle aziende italiane nell'ingegneria e nella fornitura di componenti e sistemi, l'ipotesi di una tecnologia ad acqua leggera tipo SMR, già in una prima fase dell'intervallo temporale di interesse, e di una

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

tecnologia AMR “veloce” nella sua declinazione LFR, seppure in fase temporale più avanzata, appaiono soddisfare i requisiti tecnici, industriali e temporali richiesti.

D'altra parte, l'uso di sistemi MR, che ha la caratteristica di poter dare vita a una generazione più diffusa sul territorio, vicina alle utenze industriali e non legata solo alla produzione di energia elettrica, seppur con aspetto di interesse più limitato nel campo dei giudizi espressi, può trovare una sua ragione di impiego stanti i requisiti proposti.

CAP. 5 - CONCLUSIONI

L'esame del quadro internazionale ha evidenziato, parallelamente ai numerosi progetti di realizzazione di grandi impianti nucleari di Generazione III+ (limitando gli esempi alla sola Europa, in Francia, Gran Bretagna, Polonia e Slovacchia) un'intensa attività in corso: di studio, progettazione a diversi livelli, pre-licensing, avvio di progetti realizzativi sui reattori innovativi per la produzione di energia elettrica, ma anche in diversi casi di altri vettori (calore, idrogeno). Una caratteristica comune a questi progetti è la scelta di taglie unitarie (potenza dei singoli reattori) nettamente più piccole rispetto agli impianti nucleari esistenti, di regola nell'intervallo 200 – 500 MWe (*Small Modular Reactor* e *Advanced Modular Reactor*), ma in certi casi (*Micro Reactor*) anche di solo qualche decina di MW. Tale tendenza appare giustificata dall'aspettativa che la modularità dei sistemi di impianto consenta una prefabbricazione in catene produttive esterne al sito, a vantaggio di una minor durata e complessità delle lavorazioni sul sito, con presumibile miglior qualità e minori costi. Nel caso degli *Advanced Modular Reactor*, a tale evoluzione verso potenze più basse si accompagna spesso la scelta di spettri neutronici veloci, che aprono la strada ad un ciclo del combustibile chiuso (molto ridotta necessità di estrazione del materiale fissile e incremento di almeno due ordini di grandezza della disponibilità di energia da fonte nucleare) e ad una riduzione molto consistente della necessità di depositi di rifiuti nucleari di lunghissima durata. La potenzialità di chiusura del ciclo del combustibile costituisce un importante elemento di complementarietà tra *Small Modular Reactor* e *Advanced Modular Reactor*, consentendo di alimentare i secondi con quanto recuperato dal combustibile una volta scaricato dai primi, riducendo così l'impatto complessivo per il sistema paese. Un altro importante aspetto, comune a quasi tutte le filiere innovative, è il ricorso a sistemi di sicurezza intrinseca e meccanismi più semplici e spesso passivi per ridurre la probabilità di accadimento, e fronteggiare – nell'eventualità residua – gli eventi incidentali, consentendo in alcuni casi anche la possibilità di limitare la zona di predisposizione alle emergenze al perimetro del sito; anche questo si traduce in un'accresciuta accettabilità sociale.

L'ampio lavoro di esame del contesto internazionale ha poi consentito di descrivere lo stato di sviluppo delle filiere *Small Modular Reactor*, *Advanced Modular Reactor* e *Micro Reactor* in diversi paesi, consentendo anche di mettere in luce lo stato di sviluppo per una selezione di tecnologie all'interno di queste categorie e di evidenziare le ampie e ramificate collaborazioni italiane a livello internazionale.

Coerentemente, l'esame delle realtà italiane impegnate nel settore dell'energia nucleare ha rivelato un comparto molto attivo e vivace, con la copertura di quasi tutte le fasi progettuali e realizzative, dall'ingegneria di sistema alla fabbricazione di componenti, dalle attività di ricerca a quelle di formazione universitaria e non

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

solo, con un grado di coinvolgimento in progetti internazionali che si può valutare medio-alto.

All'interno del Gruppo di Lavoro, l'analisi dei criteri da adottare per una necessaria scelta delle tecnologie da privilegiare, in un percorso verso una ripresa dell'utilizzo della fonte nucleare, ha mostrato una chiara convergenza su 4 aspetti principali: tempi più brevi di disponibilità della tecnologia e inizio del suo sfruttamento, forte coinvolgimento delle competenze e capacità industriali italiane, elevata accettabilità, sotto i profili delle aree interessate all'emergenza il più possibile contenute e della minimizzazione dei rifiuti nucleari, bassi costi di realizzazione.

Alla luce di questi criteri, e delle schede di tecnologia redatte in base a dati internazionali e alle specifiche conoscenze dei membri del Gruppo di Lavoro, si è quindi arrivati a identificare tre filiere su cui puntare:

- Small Modular Reactors (SMR) moderati e refrigerati ad acqua leggera;
- Advanced Modular Reactors (AMR) con utilizzo di piombo liquido come refrigerante, a spettro neutronico veloce (Lead-cooled Fast Reactors, LFR);
- Micro Reactors (MR) ad alta temperatura e taglia inferiore a 50 MWth.

Dato il diverso grado di maturità dei progetti e il rilevante bagaglio di esperienza accumulato sui reattori ad acqua (LWR), è ragionevole ipotizzare una sequenzialità nello sviluppo delle diverse filiere, con una prima fase di sfruttamento degli SMR e un successivo affiancamento degli AMR. Gli MR rappresentano anch'essi una tecnologia di potenziale interesse, a complemento delle precedenti due, per soddisfare specifici fabbisogni di energia elettrica e calore dei comparti industriali "hard-to-abate", in modalità cogenerativa e con impianti di piccola taglia.

CAP. 6 - ELABORAZIONE DI PROPOSTE

Al fine di pervenire all'elaborazione di proposte in merito all'implementazione di un programma nucleare in Italia, che consenta il dispiegamento di reattori nucleari di nuova concezione basati sulle tecnologie selezionate nella prima parte di questo rapporto, si è reso necessario analizzare dapprima le criticità associate al pieno sviluppo di ciascuna di tali filiere, e conseguentemente le azioni necessarie alla loro soluzione; quindi, anche sulla base del portafoglio di competenze, infrastrutture e collaborazioni a disposizione delle diverse organizzazioni del Sistema italiano, giungere all'individuazione delle attività possibili a livello nazionale.

Come nel caso della selezione delle filiere di riferimento per il Paese, anche in questo caso si è seguito l'approccio di un coinvolgimento diretto di tutte le organizzazioni che partecipano al GdL 2, mediante l'invio di un questionario atto a raccogliere, ad un opportuno livello di dettaglio, tutte le informazioni necessarie a definire gli elementi di questo capitolo.

L'analisi delle risposte ricevute ha evidenziato, in tutti i casi, la presenza sia di elementi comuni, indipendenti dalla filiera di riferimento, sia invece di elementi specifici a queste stesse filiere; nelle sezioni che seguono sono riportati, nell'ordine citato, tanto i primi quanto i secondi.

C6-1 Stato dello sviluppo delle filiere selezionate e principali criticità esistenti

Lasciando alle sezioni successive il dettaglio delle criticità specifiche a ciascuna tecnologia, che tipicamente riguardano aspetti tecnici, ve n'è uno rilevato dal sondaggio con i membri del GdL 2, applicabile a tutti i progetti delle filiere selezionate. Uno dei fattori chiave dai quali ci si attende un significativo contributo all'economia dei sistemi avanzati, è quello di basarsi su tecniche realizzative che permettano di compensare la perdita del fattore di economia di scala, prime fra tutte la modularizzazione dell'intero impianto e la serializzazione della produzione. Queste tecniche, però, al netto di pochissime eccezioni, sono relativamente nuove per l'industria nucleare, e la quantificazione della loro efficacia – in termini di potenziale risparmio in funzione del numero degli impianti realizzati – resta un punto aperto.

A livello generale, indipendentemente dalla tecnologia e dalla filiera analizzate, emerge quasi all'unisono la criticità dettata dall'assenza di un quadro regolatorio e normativo chiaramente definito al quale poter fare riferimento, sia durante lo sviluppo che, principalmente, durante la fase di realizzazione degli impianti. Se, per i sistemi SMR, il divario è meno accentuato, grazie alla piena applicabilità dei regolamenti e all'ampia trasponibilità delle normative finora applicate ai LWR, per i sistemi LFR ed MR è invece necessario predisporre per intero tale quadro,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

attualmente non esistente. L'assenza di tale quadro regolatorio e normativo è identificata come criticità non solo in vista dell'obbligo di sottoporre a *licensing* gli impianti da realizzare, ma anche, preventivamente a questa fase, della necessità di qualificare tutte le specifiche soluzioni progettuali, nonché le organizzazioni che si prevede contribuiscano alla realizzazione, facendo parte della *supply chain*.

L'identificazione di questa criticità ne evidenzia una seconda, strettamente correlata, legata al sottodimensionamento – in termini di capacità, sia umane che di competenze – dell'attuale autorità di sicurezza nucleare italiana: condizione questa coerente con l'attuale necessità nazionale in materia, ma non compatibile con i bisogni crescenti che saranno dettati dall'implementazione e gestione di un programma di generazione elettroneucleare in Italia.

Comune a tutte le tecnologie, e similmente al caso precedente, è la criticità associata all'attuale sistema di gestione dei rifiuti radioattivi. Se, oggi, questo è dimensionato, in termini di risorse, competenze ed infrastrutture, per rispondere alle esigenze di un Paese nel quale la produzione di rifiuti radioattivi è solo dovuta allo smantellamento degli impianti nucleari dismessi, e ad attività di ricerca, medicina ed applicazioni industriali, risulta evidente come tali capacità non possano risultare adeguate qualora, nel Paese, sia intrapreso nuovamente l'esercizio di impianti nucleari di potenza, includendo, in prospettiva di più lungo termine, il loro futuro smantellamento. Considerando poi l'impiego di combustibili differenti, come previsti dai sistemi delle filiere selezionate, appare ancora più cogente la necessità di approntare una soluzione al problema. Stante la selezione di due tecnologie – SMR ed AMR-LFR – che hanno la possibilità di operare sinergicamente per la chiusura del ciclo del combustibile, laddove si scegliesse strategicamente di perseguire tale possibilità ad ulteriore vantaggio della sostenibilità del programma nucleare nazionale, la criticità sopra discussa, relativa all'adeguamento del sistema di gestione dei rifiuti radioattivi, verrebbe estesa alla necessità di implementare una più vasta infrastruttura per la gestione dell'intero ciclo del combustibile.

Trasversale non solo alle criticità precedentemente descritte, ma anche ad altre, incluse quelle specifiche delle tre filiere, è il forte sottodimensionamento del capitale di risorse umane specializzate o formate su tematiche nucleari. Nonostante la presenza di corsi universitari a tema nucleare, in particolare nelle scuole di ingegneria consorziate nel CIRTEN, il numero di laureati per anno risulta ampiamente insufficiente a coprire tutte le posizioni che si renderanno necessarie per l'approntamento, l'implementazione e la gestione di un programma nucleare, presso tutte le classi di attori che in questo dovranno essere coinvolti (industria, regolatori, servizi, ricerca ed accademia stessa). Ad aggravare il problema, è la totale assenza di corsi professionali e tecnici prettamente nucleari nell'istruzione secondaria: figure queste che saranno ugualmente richieste, ed in gran numero, da

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

tutti gli attori sopra elencati. In entrambi i casi, appare inadeguata anche l'entità del corpo docente che dovrebbe essere chiamato a porvi rimedio.

Infine, anche se non strettamente legata alle tecnologie di fissione ma di portata più ampia, dal sondaggio con i membri del GdL 2 emerge la criticità connessa alla possibile volatilità della politica di supporto ad un programma nucleare, in parte anche condizionata dall'opinione pubblica.

Si rileva, infine, che le criticità di carattere generale sopra elencate, come quelle specifiche riportate nel resto della sezione C6-1, sono limitate ad aspetti direttamente connessi con le tecnologie di fissione, di pertinenza del GdL 2. A queste, devono essere sommate le ulteriori criticità derivanti dalla necessità di implementare un più vasto numero di infrastrutture [4], tutte essenziali all'avvio di un programma nucleare.

6-1.1 **SMR**

Gli SMR selezionati in questo contesto sono tutti basati sulla tecnologia dei reattori refrigerati e moderati ad acqua leggera (LWR). Per questo motivo, la maturità tecnologica è tipicamente considerata come pienamente raggiunta, anche grazie alla diretta applicabilità o trasponibilità della vasta esperienza operativa accumulata da tali reattori. Eccezioni potrebbero emergere laddove le condizioni operative degli SMR divergano in modo apprezzabile da quelle dei grandi LWR, cosa di cui allo stato attuale non c'è evidenza.

Similmente, le conoscenze tecniche ed i codici di calcolo richiesti a supporto della progettazione e *licensing* di tali impianti sono già disponibili, e in larga parte validati per applicazione ai problemi di interesse. Alcune peculiarità introdotte dai nuovi impianti, ad esempio relativamente al più vasto ricorso a soluzioni passive per i sistemi di sicurezza, determinano una necessità di estendere il campo di validazione di tali codici anche a queste nuove condizioni, al fine di consentirne la qualifica finale.

Già disponendo di una solida base tecnologica, le principali criticità possono essere individuate nei componenti e sistemi che integrano soluzioni innovative (quali i generatori di vapore di nuova concezione o i meccanismi di movimentazione delle barre di controllo immersi in acqua), e per i quali sia dunque richiesto dapprima uno studio approfondito, anche a supporto della finalizzazione del relativo progetto; successivamente, si rende necessaria una estensiva qualifica, tanto per determinare l'affidabilità operativa di tali elementi, quanto per supportarne l'approvazione da parte delle autorità di sicurezza in fase di *licensing*.

6-1.2 **AMR (LFR)**

La natura maggiormente innovativa della tecnologia LFR determina un numero superiore di criticità in vista della realizzazione di impianti AMR.

In primo luogo, l'azione corrosiva del piombo liquido, in particolare ad alte temperature, determina la necessità di materiali, e/o di tecniche di protezione superficiale, che risultano innovativi o comunque nuovi nel settore nucleare. Tali materiali e tecniche, infatti, non sono contemplati dai codici e standard di progettazione esistenti, e dunque non sono immediatamente applicabili ad un impianto nucleare se non previa qualifica. Laddove tali materiali o tecniche siano applicate a componenti e sistemi sottoposti, in reattore, ad un significativo grado di irraggiamento, la qualifica richiederà anche prove di irraggiamento in condizioni rappresentative: questa necessità è valutata come la criticità maggiore, stante l'attuale disponibilità, estremamente limitata a livello globale, di reattori sperimentali con le caratteristiche richieste.

Pur condividendo, con i reattori SFR, elementi simili o analoghi, riconducibili a passate esperienze di qualifica e di esercizio, gli LFR sono maggiormente caratterizzati dall'impiego di soluzioni innovative, per le quali il bagaglio di esperienza operativa pregressa non è applicabile. Questi componenti e sistemi (a titolo di esempio si citano le pompe meccaniche di circolazione e i generatori di vapore inseriti nel circuito del refrigerante primario) dovranno pertanto essere sottoposti, al termine del loro sviluppo, ad una completa caratterizzazione sperimentale che ne supporti la qualifica.

Tanto per i nuovi materiali, quanto per le soluzioni innovative, la capacità manifatturiera dovrà essere adeguata a consentire all'industria di realizzare i componenti ed i sistemi previsti. Ciò, a sua volta, necessita dello sviluppo e della certificazione di tutte quelle tecniche produttive appositamente approntate, per la qualifica ad operare nella *supply chain* nucleare.

Associata alla produzione ed al successivo esercizio di componenti e sistemi innovativi, è anche la necessità di disporre di nuovi dispositivi e procedure di ispezione e manutenzione, essendo riconosciuta la non applicabilità di quelli esistenti alle condizioni operative (ad esempio, l'alta temperatura) o ambientali (come l'immersione in piombo) tipiche di un LFR.

Una criticità potenzialmente rilevante è determinata dall'attuale indisponibilità di una capacità industriale per la fabbricazione del combustibile richiesto all'esercizio degli LFR. Pur essendo tale combustibile noto, ed estensivamente impiegato in passato anche in Europa, le linee produttive allora disponibili sono state dismesse, e la competenza necessaria per il loro riapprontamento è a rischio di discontinuità. Una volta che questa capacità sia resa nuovamente disponibile, mediante la

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

realizzazione di un nuovo impianto di produzione industriale di combustibile per reattori LFR, i processi produttivi dovranno essere certificati, richiedendo l'irraggiamento dei primi lotti produttivi in reattori sperimentali che consentano l'esposizione dei provini a condizioni rappresentative del reattore di riferimento: come già anticipato, esistono pochi reattori sperimentali con queste caratteristiche, nessuno dei quali in Europa.

Similmente, pur essendo noti i processi e le tecniche di riprocessamento per il combustibile esausto previsto per gli LFR, non sono ad oggi disponibili impianti idonei a tale operazione, il cui approntamento comporterebbe un elevato dispiegamento di risorse. Ciò rappresenta una criticità relativamente alla possibilità di realizzare un ciclo chiuso del combustibile per i reattori di questa filiera, anche se non condiziona lo sviluppo e realizzazione dei primi esemplari di reattori LFR di potenza.

Infine, relativamente alle conoscenze tecniche ed ai codici di calcolo, pur potendo in parte contare su quanto sviluppato per l'analisi di sistemi SFR, le specificità degli LFR determinano una disponibilità non completa rispetto all'intero spettro di analisi richieste a supporto della progettazione e del *licensing* di tali impianti. Il superamento di queste limitazioni assume carattere di rilevanza, in quanto impatta, in cascata, su tutte le attività che da ciò dipendono.

6-1.3 MR

Lo spettro delle criticità individuate per i sistemi MR non è dissimile da quello dei sistemi LFR.

In primo luogo, è necessario sviluppare, quindi qualificare, tutti i materiali innovativi introdotti nel progetto – su tutti, i compositi a base di carbonio –, nonché le associate tecniche produttive. Tale necessità assume carattere di criticità per quei materiali il cui impiego è previsto nel nocciolo del reattore, esposti quindi ad alta temperatura e grande fluenza neutronica, per i quali è anche richiesto l'irraggiamento prototipico in reattori sperimentali. Diversamente dal caso degli AMR, reattori sperimentali a spettro termico sono disponibili anche in occidente, per riprodurre condizioni prossime a quelle di un MR. La medesima criticità – inclusiva anche della richiesta di irraggiamento prototipico – è rilevata per il combustibile, di natura innovativa rispetto a quelli più noti e già qualificati. Per questo, dunque, la criticità si estende dalla fase di sviluppo a quella di qualifica del processo produttivo, comprensiva della certificazione dell'impianto di produzione.

Necessità in termini di qualifica sono identificate anche per tutti i componenti e sistemi innovativi (come, ad esempio, gli *heat pipe* con caratteristiche innovative previsti in alcuni progetti), introdotti dagli sviluppatori di tali impianti. Qualifica che, anche in questo caso, interessa non solamente il componente o sistema specifico,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

ma anche il processo produttivo ad esso associato. Tale certificazione dei sistemi e processi produttivi deve anche necessariamente essere estesa a tutta l'industria potenzialmente coinvolta nella *supply chain*.

La necessità di predisporre un numero sufficiente di installazioni sperimentali dedicate, capaci di riprodurre le condizioni operative in modo rappresentativo, ma al contempo l'assenza di impianti atti all'uso in Italia, diversamente dal caso delle altre due tecnologie qui considerate, fa sì che, almeno nel breve periodo, il contributo italiano di ricerca e sviluppo al superamento delle criticità evidenziate sia notevolmente più limitato.

Relativamente alle conoscenze tecniche ed ai codici, necessari per le analisi di operabilità e sicurezza, si rileva anche in questo caso che non sono attualmente disponibili tutti quelli che sarebbero richiesti a compiere l'intero spettro di analisi necessarie. Tali codici dovrebbero quindi essere preventivamente sviluppati e calibrati sulla base di risultati sperimentali non facilmente reperibili (in quanto non direttamente disponibili presso organizzazioni italiane).

Infine, in relazione all'approntamento del sistema nazionale anche per la gestione dei rifiuti prodotti dagli MR, si rilevano due criticità di non semplice superamento: da un lato, l'impossibilità, ad oggi, di riprocessare il combustibile esausto, ricorrendo dunque allo smaltimento diretto del combustibile medesimo e confidando nell'incapsulamento dei materiali radioattivi nelle particelle TRISO del combustibile stesso, cosa che, in un'ottica di deposito a lungo termine, necessita adeguata dimostrazione; dall'altro, le problematiche note nello smantellamento e condizionamento della grafite nucleare dopo l'irraggiamento in nocciolo.

C6-2 Attività necessarie per la soluzione delle criticità

Come evidenziato nella precedente sezione, ciascuna filiera presenta delle criticità specifiche, anche come riflesso del diverso grado di maturità della tecnologia su cui si basano. Coerentemente, ciascuna filiera necessita di attività specifiche per la soluzione delle rispettive criticità, che saranno dettagliate nel seguito.

Ciononostante, è possibile individuare alcune attività che risultano comuni a tutte le filiere selezionate, principalmente in ragione del fatto che la sequenza degli stadi implementativi di un programma volto al dispiego di una tecnologia nucleare è in larga parte indipendente da questa; concentrandosi sui passaggi di natura tecnologica di tale processo, sono richiesti: sviluppo e qualifica della tecnologia, progettazione del sistema e qualifica del progetto, approntamento e qualifica della

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

supply chain^e, autorizzazione alla realizzazione (*licensing*), realizzazione del FOAK, estensione del programma ad una intera flotta di impianti.

Estendendo inoltre l'analisi anche agli altri passaggi del processo di implementazione di un programma nucleare – quelli di natura non tecnologica – è ancora più immediato individuare attività trasversali alle diverse filiere e tecnologie.

Dalle risposte pervenute, emerge con chiarezza la necessità di procedere alla **definizione di un quadro regolatorio e normativo**. Senza voler entrare nel merito delle più approfondite analisi oggetto del GdL 4, per confronto con le tecnologie attualmente impiegate per la produzione elettronucleare, tutte le filiere selezionate nel presente studio introducono un grado di innovazione che, prima di ogni altra cosa, deve essere compreso, recepito e implementato nelle regolamentazioni e normative di sicurezza nucleare, anche laddove già esistenti, così che queste risultino complete ed appropriate a garantire il pieno controllo di ogni attività associata alla realizzazione di un impianto SMR, AMR o MR. Lasciando alle sezioni successive la discussione delle attività per lo sviluppo del quadro normativo specifico a ciascuna tecnologia, si anticipa qui la necessità di elaborare un insieme completo di regolamenti, a partire dal quadro legislativo, che recepisca tutte le direttive internazionali – ed europee in particolare –, nonché le migliori pratiche disponibili.

Le soluzioni innovative introdotte nei diversi progetti necessitano di un processo di sviluppo che, pur partendo da una diversa maturità della tecnologia sottostante, culmini nella completa **qualifica di tutte le innovazioni** introdotte nelle tre filiere; qualifica basata sul quadro regolatorio e normativo di cui sopra, che a sua volta deve essere differenziato sulla base delle peculiarità delle diverse tecnologie. Per questo motivo, e per il grado molto disomogeneo dello stato delle attività richieste a risolvere le criticità tecniche dei sistemi delle tre filiere selezionate, una discussione in maggior dettaglio sarà riservata alle sottosezioni dedicate a ciascuna filiera, presentate nel seguito. Relativamente indipendente dalla tecnologia è invece la necessità di qualifica di tutti i processi innovativi di progettazione (ad esempio, basati sull'intelligenza artificiale) o fabbricazione (come l'*additive manufacturing* o tecniche avanzate di saldatura o rivestimento), anche questa da basarsi sul quadro normativo di riferimento che, anticipatamente, dovrà essere reso disponibile.

L'autorizzazione finale alla costruzione ed all'esercizio dei futuri impianti si basa sulla disponibilità di codici di calcolo qualificati, per i quali, nel caso degli SMR, può essere necessario un lavoro di validazione che ne consenta l'estensione d'uso a

^e In questo capitolo, e nei successivi, si farà riferimento all'intera catena del valore, inclusiva di tutte le organizzazioni coinvolte nella realizzazione di un impianto, con il termine equivalente inglese di "supply chain", così da riservare l'omologo in italiano, "catena del valore", alla parte della supply chain complessiva per la quale contribuiscono le sole organizzazioni italiane coinvolte.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

condizioni di funzionamento che si differenziano (laddove applicabile) da quelle dei reattori per i quali furono sviluppati e qualificati mentre, nel caso degli AMR e degli MR, che utilizzano tecnologie maggiormente innovative, il lavoro di sviluppo e qualifica risulterà più intenso. L'estensione della validazione o l'intera qualifica dei codici dovrà essere eseguita a fronte di risultati sperimentali di riferimento: è pertanto necessario approntare installazioni sperimentali – inclusi in particolare reattori di ricerca – presso le quali condurre test in condizioni rappresentative e secondo procedure in garanzia di qualità.

Anche le realizzazioni meno caratterizzanti un impianto nucleare, come ad esempio le opere civili, possono comunque contenere elementi di innovazione determinati dall'obiettivo di massimizzare il ricorso alla produzione in serie e/o alla modularità di fabbricazione ed assemblaggio. Tutte tali realizzazioni devono essere attentamente studiate, per consentire successivamente di valutare se ed in che misura le capacità delle attuali infrastrutture produttive siano adeguate alle nuove necessità, e, nel caso, quali interventi debbano essere apportati a queste per conseguire l'adeguatezza richiesta. Ogni **ampliamento e modifica delle infrastrutture produttive** dovrà essere sottoposto ad una certificazione di qualità nucleare, in particolar modo in quei casi in cui oggetto della realizzazione siano componenti, strutture e sistemi rilevanti per la sicurezza dell'impianto.

A supporto di queste certificazioni, ed in particolare qualora esse coinvolgano materiali e processi produttivi innovativi, potranno essere richiesti non solo laboratori specialistici, da realizzarsi internamente alle aziende, per eseguire le qualifiche necessarie contestualmente alla fabbricazione di componenti, sistemi e moduli direttamente in stabilimento, ma anche idonei **laboratori ed organismi terzi centralizzati**. Tali laboratori ed organismi avranno il compito di fornire servizi di prova (necessarie, ad esempio, per la qualifica di nuovi processi produttivi e componenti e sistemi innovativi) e certificazione (accreditando i laboratori specialistici), in accordo ai dettami dei nuovi regolamenti e normative stabiliti dalle autorità di sicurezza. L'approntamento dei laboratori centralizzati potrà in determinati casi avvenire tramite potenziamento di quelli attualmente esistenti.

Sempre trasversale alle tre filiere selezionate, è l'approntamento di un sistema completo di gestione dei rifiuti radioattivi che tenga in debita considerazione le specificità dei sistemi e delle tecnologie loro associate. Nuovamente, lasciando al GdL 5 il compito di definire le azioni specifiche a tal riguardo, si richiama qui la necessità di estendere il sistema all'intero ciclo del combustibile, così da garantire la gestione in sicurezza non solo del combustibile esausto – oggi non più generato in Italia – ma anche di un maggior volume di rifiuti a minor intensità e più breve vita. Tale approntamento dovrebbe riguardare le capacità e le infrastrutture necessarie al trattamento, al condizionamento, alla messa in sicurezza e quindi allo smaltimento finale dei rifiuti.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Infine, l'affinamento della conoscenza in tutti gli ambiti sopra elencati, quali il progetto (attraverso la qualifica dei componenti e sistemi più innovativi), la *supply chain* (mediante l'apprezzamento della capacità realizzativa dell'industria a realizzare un impianto nella sua interezza) ed il ciclo del combustibile sono elementi essenziali per poter raffinare anche le valutazioni economiche e di performance dell'impianto e di sistema, così da poter arrivare a stabilire con accuratezza il caso economico associato all'introduzione di ciascuna filiera di reattori innovativi nel contesto energetico di riferimento.

6-2.1 SMR

Come detto, la maggior parte delle attività specifiche ad una filiera sono principalmente funzione dal diverso grado di maturità della tecnologia, che, nel caso degli SMR, è allo stadio più avanzato, grazie alla diretta applicabilità o trasponibilità della vasta esperienza operativa accumulata dai grandi reattori ad acqua, quali quelli operanti in Europa e negli Stati Uniti.

Per lo sviluppo e la successiva **qualifica dei componenti e sistemi innovativi**, proposti da alcuni progettisti come elemento di innovazione e discontinuità con i grandi reattori ad acqua, le attività richieste sono in primo luogo di natura sperimentale. Per ciò, occorrono *mockup* prototipali, possibilmente di dimensioni rilevanti, da testare per ricavarne tutte le informazioni relative al comportamento (sia in condizione nominale che non-nominale) e all'affidabilità. E, in tandem con questi, installazioni sperimentali dove sia possibile eseguire i test sopra citati, collezionando i dati secondo protocolli in garanzia di qualità, così che i risultati possano essere anche esibiti ad una autorità di sicurezza per la certificazione dei componenti e sistemi studiati. In particolare, devono essere studiati componenti e sistemi associati a funzioni di sicurezza svolte in modo passivo, essendo tali elementi quelli tipicamente contenenti il massimo grado di innovazione nei progetti SMR rispetto a quelli LWR. Stante il loro ruolo di sicurezza, per questi elementi i connotati di rappresentatività e rilevanza della sperimentazione assumono un carattere di necessità.

Il grado di innovazione dei componenti e sistemi da testare e qualificare necessariamente richiede anche un coinvolgimento dell'industria manifatturiera, per lo studio delle caratteristiche di progettazione e realizzazione, e l'approntamento della filiera atta a realizzare tali componenti e sistemi. La partecipazione dell'industria non solo nella realizzazione dei *mockup* sperimentali, ma anche nelle fasi di prova permetterebbe a questa di acquisire un grado di competenza sempre più adeguato a quello richiesto per la produzione in qualità nucleare ai fini dell'impiego di tali componenti e sistemi in un impianto nucleare.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Le medesime installazioni sperimentali potranno essere impiegate anche per la verifica dell'estensione dei limiti di applicabilità dei codici di calcolo esistenti a fronte delle configurazioni e delle condizioni di funzionamento tipiche degli SMR. La qualifica dei codici dovrà basarsi, infatti, su condizioni e configurazioni caratteristiche e rappresentative dei sistemi a cui si intende applicarli: condizioni che, come visto, sono requisiti comuni alle prove sperimentali di qualifica dei componenti e sistemi di interesse.

Tanto relativamente alla qualifica di componenti e sistemi, quanto alla verifica di applicabilità dei codici di calcolo, anche l'autorità di sicurezza dovrà essere coinvolta: ad un livello minimo, fornendo supporto nella definizione delle prove e delle condizioni di prova richieste ad una qualifica esaustiva degli elementi innovativi del progetto in vista del *licensing* del medesimo; più estensivamente, per consentire una collezione di dati sperimentali che permetta di validare anche i codici di calcolo in dotazione all'autorità di sicurezza, necessariamente indipendenti da quelli impiegati dall'Industria.

6-2.2 **AMR (LFR)**

Nel caso degli LFR, alle attività indicate per gli SMR si aggiunge, anzi si deve anteporre, una serie di azioni necessarie a far avanzare la maturità della tecnologia di refrigerazione per mezzo di piombo liquido. È comunque opportuno sottolineare come il grado di maturità tecnologica non sia affatto basso, anche e soprattutto grazie all'impegno profuso da svariate organizzazioni nazionali sulla ricerca e sviluppo di tale tecnologia, su un arco temporale superiore a 20 anni: esperienza pregressa, e da organizzazioni nazionali, che è infatti uno dei criteri in base ai quali è stata operata, nella prima fase di questo rapporto, la scelta della filiera LFR fra tutte quelle di IV Generazione opzionabili per l'implementazione in Italia.

In primo luogo, si richiede lo sviluppo e la qualificazione di materiali capaci di operare in presenza di piombo fluente per tempi di esposizione significativi per la vita del reattore, e/o di tecniche di condizionamento del piombo stesso (come quelle per il controllo del tenore di ossigeno disciolto) per consentire a materiali noti di operare in modo sicuro ed affidabile. La strategia potrebbe prevedere soluzioni differenti per applicazione a diversi orizzonti temporali. In una prima fase, materiali già noti e qualificati nel settore nucleare potrebbero essere impiegati, limitando la temperatura operativa degli LFR in modo che tecniche di condizionamento del piombo consentano una auto-protezione alla corrosione, per mezzo di una passivazione superficiale. Tali tecniche andrebbero testate in larga scala, e qualificate per l'uso industriale. A più lungo termine, ambendo a rimuovere il vincolo sulle temperature operative a vantaggio dell'efficienza di generazione elettrica e di cogenerazione di calore, potrebbero essere considerati tanto

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

rivestimenti protettivi, da applicare su materiali già qualificati, quanto nuove classi di materiali intrinsecamente resistenti alla corrosione. Per i rivestimenti protettivi, è necessario prevederne lo sviluppo e la qualifica, incluse prove in cui campioni sono sottoposti all'azione simultanea del piombo e di un flusso neutronico in condizioni rappresentative, nonché l'industrializzazione delle associate tecniche di deposizione sulle superfici dei materiali strutturali esposti all'azione corrosiva del piombo. Per i nuovi materiali, invece, lo sviluppo dovrebbe prevedere non solo campagne di preselezione, mediante prove di corrosione in piombo e caratterizzazioni meccaniche, ma anche, periodicamente, prove di irraggiamento neutronico, per confermare il comportamento di tali materiali in condizioni rappresentative del nocciolo del reattore. In tutti i casi sopra citati, le regole di progettazione tipicamente incluse nei codici e standard di progettazione nucleare andrebbero estese ad includere gli effetti ambientali determinati dal piombo liquido, o l'intero set di proprietà fisico-chimiche nel caso di nuovi materiali. L'introduzione di rivestimenti e nuovi materiali richiede anche un adeguamento dell'industria ad attività di produzione e lavorazione di prodotti basati su questi, anche in accordo con le regole riportate nelle versioni estese dei codici e degli standard nucleari.

L'impiego del piombo e l'esercizio del nocciolo in presenza di uno spettro neutronico veloce determinano, in generale, innovazioni che non si limitano solo ad alcuni componenti e sistemi, ma si estendono anche alla strumentazione, ai metodi di ispezione, alle operazioni di esercizio e manutenzione (ad esempio, le attrezzature e le associate procedure di ricarica del combustibile o di manipolazione di componenti e sistemi). Similmente al caso degli SMR, tutti questi elementi richiedono una qualifica prima del loro impiego in un impianto; d'altra parte, però, l'esperienza operativa degli LWR, dalla quale gli SMR potevano trarre vantaggio è, nel caso degli LFR, limitata al margine di trasponibilità dall'esercizio passato di impianti SFR o da eventuali e limitate informazioni sui reattori a lega eutettica di piombo-bismuto. Pertanto, prima della qualifica, sono necessarie campagne di ricerca e sviluppo di tutte queste soluzioni, da operarsi su installazioni sperimentali via via più grandi, fino a consentire la qualifica su scala prototipica ed in condizioni operative (nominali e non) pienamente rappresentative. Come nel caso degli SMR, per tutti questi elementi, oltre alla qualifica, deve essere predisposto l'approntamento della *supply chain* per la loro fornitura, adeguando tecniche e, dove richiesto, macchinari, e certificando i processi di fabbricazione.

In parallelo alla qualifica di tutti gli elementi innovativi di un LFR, i risultati delle prove sperimentali raccolti devono essere utilizzati anche per formare la base tecnica e tecnologica di conoscenza necessaria alla definizione del **quadro normativo** specifico al *licensing* di un LFR. Infatti, mentre i regolamenti – riguardando aspetti di più alto livello – possono avere caratteristiche di neutralità tecnologica che li rendano applicabili a tutte le filiere, quando si entra più nel

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

merito dei criteri di valutazione della sicurezza di un impianto, le norme che fissano i requisiti essenziali devono contenere elementi specifici delle diverse tecnologie, basati appunto su evidenze sperimentali.

Un caso di particolare rilevanza riguarda il combustibile nucleare, per il quale, come indicato nella sezione 6-1.2, non esiste attualmente una filiera consolidata di fornitura né di riprocessamento^f, e non sono quindi neppure possibili stime consolidate dei costi associati. Per ovviare a tale criticità nei tempi più brevi possibile, è necessario sfruttare l'analogia fra il combustibile richiesto dagli LFR e quello già impiegato e qualificato in passato per alimentare i reattori veloci che hanno operato in Europa – e particolarmente in Francia –, recuperando la conoscenza pregressa e riqualificando una capacità produttiva su scala industriale. È opportuno, a tal proposito, citare l'iniziativa recentemente intrapresa da *newcleo* in Francia e relativa, appunto, alla realizzazione di una fabbrica di combustibile per reattori veloci.

Preliminarmente alla fase di qualifica dei codici di calcolo – che concettualmente non differisce da quella prevista, e descritta, relativamente agli SMR, seppur anticipatamente più vasta in scopo per gli AMR –, dovranno essere sviluppati tutti i codici richiesti ma attualmente non disponibili. Tale sviluppo, comunque, potrà trarre vantaggio sia dalle analogie tra LFR e SFR, che rendono possibile l'adattamento dei codici disponibili per i secondi anche al caso dei primi; sia dalla base sperimentale già disponibile presso alcune organizzazioni italiane, che consente la calibrazione dei modelli contenuti nei codici rispetto alle fenomenologie ed alle condizioni specifiche degli LFR.

Infine, similmente al caso degli SMR, è necessario analizzare le caratteristiche costruttive ed operative degli AMR in modo da caratterizzare le necessità di un sistema di gestione dei rifiuti radioattivi generati da questi ultimi, in particolare nell'ipotesi di una implementazione di un ciclo chiuso del combustibile nucleare. Tale caratterizzazione permetterebbe di apprezzare le implicazioni sulla definizione del sistema stesso di gestione dei rifiuti (ad esempio, relativamente alla gestione del piombo attivato) e, più in generale, dell'intero ciclo del combustibile, dalla quale deriverebbero anche le azioni specifiche di approntamento delle competenze e delle infrastrutture sperimentali associate, aspetto per cui si rimanda alle conclusioni del GdL 5.

^f Capacità questa, seppur non strettamente necessaria per l'esercizio di tali reattori, certamente richiesta qualora si volesse operarli nel cosiddetto ciclo chiuso, modalità auspicabile per la riduzione tanto del fabbisogno di nuove risorse quanto dei rifiuti generati.

6-2.3 MR

Il caso degli MR si colloca, in un certo senso, in posizione intermedia tra gli SMR e gli AMR. Anche gli MR – quantomeno, quelli considerati nel presente studio – si basano su una tecnologia – quella degli HTGR – investigata e provata in passato, anche in Europa, introducendovi innovazioni e modifiche; tale tecnologia, però, non è più in uso, almeno in Europa, e le associate competenze e capacità – tanto sperimentali quanto industriali – sono spesso andate perdute, necessitando una ricostituzione e riqualifica. Ciò non è accaduto in Giappone, Stati Uniti e Cina. A ciò, si somma l'ulteriore necessità, sperimentale e manifatturiera, determinata dalle innovazioni progettuali proposte, che differenziano gli MR dai sistemi di analogia tecnologia sperimentati in passato. Anche per questi, sono essenziali installazioni sperimentali a supporto delle campagne di test previste.

In primo luogo, occorrono normative specifiche, da svilupparsi, come per gli LFR, ex novo, con limitate possibilità di mutuarle da altre, disponibili a livello internazionale.

Tutti i materiali innovativi necessitano di una completa caratterizzazione, incluso – ove opportuno – sotto irraggiamento neutronico. Alcuni altri, pur sviluppati e noti, non sono inclusi tra quelli standardizzati, normati nei codici di progettazione nucleare. Come nel caso degli LFR, tutti i dati e le proprietà di questi materiali andrebbero inclusi in tali codici per consentire la progettazione di componenti e sistemi su basi certificate, nonché la qualifica dei processi di fabbricazione di tali componenti e sistemi.

Come per gli LFR, non è attualmente disponibile una capacità produttiva del combustibile necessario ad operare gli MR. Anche in questo caso, sarebbe opportuno recuperare le competenze eventualmente ancora disponibili, nonché riappareggiare e riqualificare un impianto di produzione su scala industriale. È nuovamente opportuno notare che, anche per il caso degli MR, la società USNC ha già predisposto un impianto pilota per la produzione, su piccola scala, di combustibile prototipico, il cui primo lotto è attualmente sottoposto a sperimentazione sotto irraggiamento ai fini della qualifica del prodotto e del processo di produzione associato.

Anche per gli MR, la disponibilità di codici di calcolo è limitata, richiedendo, prima della inevitabile fase di validazione, anche lo sviluppo di nuovi software ai fini della loro qualifica. Tale qualifica, come per i componenti e sistemi innovativi, richiede installazioni sperimentali dedicate, in scala adeguata a rappresentare correttamente tutte le fenomenologie specifiche di tale tecnologia.

Infine, poiché l'attuale strategia di gestione del combustibile impiegato dagli MR una volta esausto si basa sul deposito geologico, ovvero in ciclo aperto, ed in

ragione della presenza di quantitativi rilevanti di grafite attivata in nocciolo, sono necessarie analisi puntuali che consentano di rilevare le peculiarità di questi sistemi ai fini di orientare correttamente l'adeguamento del sistema di gestione dei rifiuti radioattivi ad includere anche la casistica degli MR.

C6-3 Ricognizione delle specifiche competenze italiane e collaborazioni internazionali in essere

Nei capitoli precedenti si sono evidenziate le specifiche criticità tecnologiche di ciascuna filiera e le infrastrutture e competenze necessarie per giungere al pieno sviluppo e avviare la costruzione di un FOAK. Il percorso di sviluppo richiede una sinergia fra ricerca e sviluppo, servizi d'ingegneria e produzione industriale, ciascuno con altissima esperienza e competenza in campo nucleare. Come già citato nella sezione C2-3 le competenze italiane nel campo della fissione nucleare si sono mantenute aggiornate e ad un altissimo livello attraverso partecipazioni a progetti di ricerca e sviluppo internazionali, acquisizione di contratti di fornitura nella costruzione di impianti nucleari all'estero ed esercizio di impianti di produzione di energia elettrica. Nei prossimi paragrafi si riassumeranno le competenze italiane e le collaborazioni internazionali attive specifiche per ciascuna filiera, con particolare riferimento al settore industriale. Il settore accademico, quello delle società di ingegneria e quello centri di ricerca, infatti, nel loro complesso hanno competenze piuttosto trasversali, maturate attraverso la partecipazione a progetti europei e le collaborazioni con soggetti industriali. Ciò ha consentito a tali settori di acquisire esperienza su progettazione, verifica e analisi di sicurezza dei sistemi mediante l'utilizzo dei codici più accreditati e di strutture sperimentali da tempo coinvolte in studi e prove di qualifica di sistemi e componenti della filiera SMR e della filiera AMR-LFR. Ne sono testimonianza la Siet e le sue strutture sperimentali da sempre dedicate alla verifica e qualifica di grossi componenti nucleari e circuiti ad acqua in pressione (generatori di vapore) e che attualmente sta progettando in collaborazione con Ansaldo Nucleare una sezione di prove termo-idrauliche ad alta temperatura (Impianto Esperienze Termo-Idrauliche – IETI). Analogamente, l'ENEA da decenni è impegnata nello sviluppo della tecnologia del piombo liquido e nella promozione dello sviluppo di un progetto AMR-LFR italiano, sia con studi di carattere teorico sia con il supporto delle proprie strutture sperimentali.

6-3.1 SMR

Ansaldo Nucleare è fra le industrie italiane che hanno presidiato e accresciuto le proprie competenze nella progettazione di sistemi, strutture e componenti nucleari conformi ai maggiori standard di sicurezza in ambito nucleare. Ha esperienza con le procedure di *licensing* internazionali, fra cui, in Europa, quella francese, quella romena e quella inglese. Ciò le consente di integrare una catena del valore

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

rivolgendosi ad un nutrito bacino di aziende italiane qualificate per la fornitura di grandi componenti e macchine in accordo ai più elevati standard internazionali. In riferimento specifico agli SMR, ha inoltre diverse collaborazioni internazionali in essere: di rilievo è l'accordo siglato con EdF, la sua controllata Nuward e Edison per lo sviluppo di componenti dell'isola nucleare e dell'isola convenzionale (BOP). Nell'ambito di questo accordo, Ansaldo Nucleare ha anche il compito di coinvolgere un'ampia catena di fornitori italiani ed europei, valutandone la capacità produttiva in termini quantitativi e di qualifica del prodotto. Altri accordi internazionali da menzionare sono l'accordo con Rolls Royce per lo sviluppo del contenimento metallico e del sistema di movimentazione e gestione del combustibile del proprio SMR, e i contatti con GE-Hitachi per lo sviluppo dell'isolation condenser previsto nel progetto BWRX-300.

Altra industria da citare per l'ampiezza delle proprie competenze è la Mangiarotti (Westinghouse Italia), che è il maggiore centro produttivo della Westinghouse in Europa. La possibilità di accedere all'esperienza e alle risorse della casa madre le consentono di coprire l'intero ciclo di vita di un impianto nucleare. Inoltre, le competenze sviluppate dalla Mangiarotti nella produzione e fornitura di componenti nucleari qualificati di grandi dimensioni nei propri stabilimenti italiani sono di altissimo livello. Ciò è comprovato anche dalla disponibilità di strutture dedicate a controlli non distruttivi di componenti di elevato spessore, effettuati mediante radiografie di alta qualità, come pure dall'utilizzo di laboratori metallurgici per prove meccaniche e chimiche, altamente specializzati e utilizzati anche per la qualifica di personale (saldatori) e processi di saldatura conformi ai codici internazionali (BPVC di ASME e RCC-MR di AFCEN).

Una nota finale riguarda le *utilities*, in particolare, Edison ed ENEL. La prima, Edison, pur non avendo esperienza pregressa nell'esercizio di impianti nucleari, in quanto parte del gruppo Electricité de France (EdF) e coinvolta nell'accordo di sviluppo del progetto Nuward, cui partecipa anche Ansaldo Nucleare, può vantare i benefici dell'accordo e il ricorso all'esperienza e alle risorse della casa madre, per gestire il percorso autorizzativo necessario per la costruzione di un impianto, la fase di costruzione e infine l'esercizio dello stesso. La seconda, ENEL, sebbene gli esiti dei referendum italiani sul nucleare, la privatizzazione e i conseguenti riassetti societari abbiano disperso le ██████████ competenze su costruzione ed esercizio di impianti nucleari, acquisite a partire dalla sua costituzione sino alla fine degli anni '80, in anni recenti ha potuto ricostituire parte delle competenze, partecipando attivamente alla costruzione e messa in servizio di centrali estere (Mochovce-3 in Slovacchia) ed esercendo una flotta di impianti nucleari in Spagna.

6-3.2 AMR (LFR)

La conoscenza italiana sulla tecnologia dell'uso delle leghe di piombo e del piombo stesso quale refrigerante per sistemi nucleari si inizia a sviluppare negli anni novanta del secolo scorso anche grazie alla disponibilità di informazioni relative all'uso di reattori nucleari veloci refrigerati a lega eutettica piombo bismuto per uso militare nell'ex-Unione Sovietica. Al contempo da un'idea del premio Nobel Carlo Rubbia di un sistema sottocritico sostenuto da acceleratore con un nocciolo refrigerato a lega di piombo bismuto/piombo prendevano il via tre grandi programmi nazionali di ricerca denominati TRASCO (TRASmutazione SCORie) finanziati da consistenti contributi pubblici a sostegno di questi sviluppi tecnologici in Italia. In questo quadro Ansaldo Nucleare è stata fra le prime grandi industrie che, negli anni 2000, hanno contribuito alla costituzione una iniziativa Europea per la realizzazione di un primo dimostratore basato sulla tecnologia dei reattori veloci refrigerati a piombo liquido. Dopo un primo progetto europeo (ELSY), finanziato dall'EURATOM e coordinato da Ansaldo, avente come obiettivo la definizione di un primo progetto industriale di reattore a piombo, ne è seguito un secondo (LEADER), sempre coordinato da Ansaldo, finalizzato alla definizione del relativo dimostratore: ALFRED. Il consorzio del progetto comprendeva altri 16 partecipanti, la maggioranza dei quali era italiana. Nel 2013, per dare una ulteriore spinta industriale allo sviluppo del dimostratore, Ansaldo ha riunito in un consorzio internazionale (FALCON) numerosi soggetti Europei, rappresentativi del mondo industriale, del mondo accademico e degli istituti di ricerca. Fra questi la romena RATEN-ICN (Agenzia autonoma per le tecnologie dell'energia nucleare – Istituto per la ricerca nucleare) e l'italiana ENEA. Nel corso degli anni il progetto iniziale del dimostratore è stato profondamente rivisto da Ansaldo Nucleare ed ENEA al fine di migliorarne prestazioni e robustezza. Sulla base del progetto aggiornato sono state avviate le prime interazioni con l'ente regolatore romeno (CNCAN) e la caratterizzazione del sito dove installare il dimostratore. Ansaldo Nucleare ha contribuito alla costruzione di infrastrutture sperimentali tecnologicamente avanzate presso la sede ENEA di Brasimone, che hanno consentito ad ENEA di investigare a fondo le fenomenologie legate ai metalli liquidi ed in particolare al piombo liquido, i cui risultati hanno contribuito all'evoluzione del progetto ALFRED.

Si ricordano un paio di tali infrastrutture:

CIRCE - in Europa, è la più grande struttura a piscina per prove sperimentali con metallo liquido pesante. Ha un'altezza di 8 m, un diametro di 1.2 m e contiene circa 90 tonnellate di piombo bismuto. Consente di effettuare prove su componenti in scala 1:1 in altezza e viene utilizzata per investigare la termoidraulica di diversi componenti di un LFR. Un esempio, i meccanismi di transizione da circolazione

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

forzata a circolazione naturale in prototipi di generatori di vapore di LFR, in caso di incidente.

NACIE – è un circuito termoidraulico che consente la circolazione naturale di metallo liquido. È stato utilizzato per lo studio della transizione del moto del fluido da circolazione naturale a circolazione forzata e prove sperimentali di diversi prototipi di elementi di combustibile.

In Italia Ansaldo Nucleare non è l'unica industria a promuovere un proprio progetto di AMR-LFR. Da alcuni anni *newcleo* sta sviluppando un proprio progetto di AMR-LFR e un modello industriale integrato che tende a coprire tutto il ciclo industriale: progettazione, costruzione, esercizio, fabbricazione, trattamento e riciclo del combustibile fino a giungere ad un ciclo chiuso. Il suo programma di sviluppo industriale prevede in parte acquisizioni (fa già parte di *newcleo* la società di ingegneria SRS), e in parte collaborazioni internazionali, soprattutto sul tema del ciclo del combustibile. La progettazione della fabbrica del combustibile (MOX) è effettuata soprattutto in Francia, nelle sedi di Avignone e di Lione. Attualmente il lavoro tecnico si avvale per il 50% di fornitori esterni (Ingérop, Onet, Assystem, Framatome). Tuttavia, il programma di sviluppo prevede una graduale riduzione dell'apporto di fornitori esterni e il trasferimento nella sede di Torino di gran parte delle attività di progettazione, con un possibile supporto di fornitori italiani. La progettazione del reattore è in massima parte effettuata in Italia, su questo tema ci sono degli accordi con il mondo accademico italiano, ed in particolare con le università facenti parte del CIRTEN, su diversi temi di interesse (Politecnico di Torino – prove sperimentali, termoidraulica e neutronica; Politecnico di Milano – materiali; Università La Sapienza – sviluppo codici termoidraulici; Università di Pisa – analisi incidentali). Di rilievo è l'accordo con ENEA sullo sviluppo del progetto del nocciolo e della tecnologia del piombo liquido. Su quest'ultimo tema l'accordo prevede la costruzione di nuove strutture sperimentali presso la sede ENEA di Brasimone. Infine, si segnala che *newcleo* è anche una delle aziende accreditate in Francia nell'ambito del programma France 2030 e questo consente a *newcleo* l'accesso ad un finanziamento diretto da parte di BpiFrance, e di beneficiare del supporto del CEA su aspetti specifici della progettazione e della componentistica. Il CEA, ad esempio, si impegna a fornire alla fabbrica MOX di *newcleo* le guaine in AIM1 per la realizzazione delle barrette di combustibile.

6-3.3 MR

Le competenze industriali italiane sulla filiera degli MR sono possedute principalmente da due aziende: Mangiarotti (Westinghouse ITALIA) e Ultra Safe Nuclear Italia.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Mangiarotti si avvale delle competenze e dell'esperienza della casa madre Westinghouse, impegnata nello sviluppo di impianti per la produzione del micro reattore eVinci, in Nord America.

Ultra Safe Nuclear Italia fa riferimento alla casa madre USNC che si dichiara pronta alla costruzione di due modelli di micro reattore specializzati nella fornitura di calore, il primo ad una temperatura di 650 °C, il secondo alla temperatura di 950 °C. Modelli più evoluti proposti per applicazioni nella propulsione navale necessitano di ulteriori sviluppi. Per la produzione in Italia, USN Italia ha siglato un accordo con SIMIC per la fornitura dei componenti in pressione, della meccanica e di parti dell'isola nucleare. Due ulteriori aziende italiane – CAEN S.p.A., con una rilevante competenza sulla strumentazione per misure radiologiche e sistemi di salvaguardie nucleari, e Mersen, che ha grande esperienza nella produzione di grafiti anche di grado nucleare – potrebbero occuparsi, rispettivamente, della fornitura dei sistemi di misura e controllo e della grafite dei micro reattori da installare.

C6-4 Valutazione delle possibili attività nazionali per supportare lo sviluppo delle filiere selezionate

Preliminarmente e propedeuticamente a tutto quanto segue, emerge da diverse delle organizzazioni partecipanti al GdL 2 la necessità di **continuità nel supporto politico** in questa direzione, e l'opportunità di un forte **coordinamento a livello ministeriale** dei passi del piano per il ritorno in Italia alla produzione di energia mediante il nuovo nucleare sostenibile.

È inoltre opportuno sottolineare la necessità di integrare le azioni sotto riportate nel contesto di un quadro di intervento più ampio, avente ad oggetto tutte le infrastrutture necessarie ad approntare il Paese per l'avvio di un programma nucleare [4]. Alcune delle azioni riferite al più vasto contesto nazionale sono oggetto di altri GdL della Piattaforma.

L'analisi delle azioni necessarie ad ultimare lo sviluppo delle filiere selezionate, apportando soluzioni alle criticità a queste associate, ha evidenziato come una dimensione europea ed internazionale sia non solo auspicabile, ma assolutamente inevitabile: non solo per i sistemi SMR e MR, i cui progettisti e *vendor* sono organizzazioni estere, ma anche per i sistemi LFR, per i quali le organizzazioni nazionali operano ambendo ad assumere tali ruoli. Ciò nonostante, tanto meglio il Sistema italiano saprà approntarsi a contribuire alle attività discusse nella sezione C6-2, tanto più le organizzazioni nazionali potranno intervenire nei programmi di sviluppo, progettazione, qualifica e realizzazione dei sistemi selezionati, anche in un contesto internazionale. Questo approntamento dovrà anche essere predisposto tempestivamente, così che le opportunità di collaborazione e

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

partecipazione ai suddetti programmi possano manifestarsi già in fase di realizzazione del FOAK.

Sotto tale premessa, e con la prospettiva ben definita di preparare il Sistema italiano ad un programma nucleare anche in Italia, è possibile individuare alcune attività propedeutiche, sia specifiche alle diverse filiere (e dunque discusse in dettaglio nelle sottosezioni successive), che comuni a tutte le filiere selezionate, prima su tutte – anche temporalmente – **l'ampliamento del patrimonio di risorse umane** specializzate in tema nucleare disponibili nel Paese. A tal fine, sono individuate due azioni specifiche:

- da un lato, l'incremento del personale coinvolto in attività nucleari, per il quale è necessario in primo luogo un potenziamento dell'offerta formativa di ogni ordine e grado, dagli istituti professionali a quelli tecnici, dall'università ai corsi post-laurea, e, contestualmente, un ampliamento del corpo docente chiamato a sostenere tale potenziamento;
- dall'altro, l'estensione dei piani di formazione specifica e continuativa, siano essi forniti direttamente in seno alle organizzazioni interessate o da enti diversi per conto terzi.

Un supporto all'ampliamento delle risorse umane potrebbe derivare da azioni atte a facilitare il rientro di esperti, anche italiani, attualmente impegnati all'estero, in particolare relativamente all'acquisizione di personale già formato sui temi di interesse.

La collaborazione tra istruzione, accademia, ricerca ed industria permetterebbe di accelerare e massimizzare l'efficacia di tali azioni. Inoltre, la diffusione della cultura nucleare già nella scuola dell'obbligo potrebbe promuovere l'intenzione di intraprendere la carriera nucleare in un maggior bacino di studenti.

Di pari importanza è l'azione volta al **potenziamento dell'autorità di sicurezza nucleare** nazionale, per renderla adeguata al compito di regolamentare, valutare ed approvare le attività in campo nucleare che, conseguentemente al riavvio di un programma nucleare nel Paese, andrebbero ad aggiungersi a quelle ad oggi in essere. Prime fra tutte, vanno ricostituite le capacità di autorizzazione e monitoraggio della costruzione e dell'esercizio di impianti elettronucleari e di eventuali impianti a supporto della gestione del ciclo del combustibile.

Anche in questo caso, il potenziamento non riguarderebbe solamente l'ampliamento della pianta organica, ma anche l'estensione del portafoglio di competenze disponibili in seno all'autorità di sicurezza. Per quest'ultima finalità, **accordi di collaborazione** con le più qualificate autorità di sicurezza internazionali, che prevedano, ad esempio, lo scambio o l'addestramento all'estero, sul campo,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

potrebbero risultare preziose al fine di accelerare il processo di potenziamento dell'autorità nazionale.

Associata al potenziamento dell'autorità di sicurezza nucleare nazionale, è l'azione volta alla **costituzione di un completo quadro regolatorio e normativo**. A tal riguardo, e considerato il fatto che gli impianti delle filiere qui selezionate saranno di natura modulare, la cui realizzazione avverrà principalmente in fabbrica in un contesto ripetitivo, la standardizzazione di tale quadro in un contesto internazionale, o quantomeno europeo, per quanto concerne le procedure relative all'individuazione dei siti idonei, alla qualifica dei produttori e alla valutazione e *licensing* degli impianti, consentirebbe di accelerare i tempi di approntamento del quadro normativo stesso, di facilitare l'ingresso di nuovi fornitori nel mercato, e di promuovere l'esportazione di tecnologie nucleari da e verso l'Italia, a beneficio della riduzione dei costi di realizzazione e, nuovamente, della celerità di implementazione di un programma nazionale.

Ogni possibile azione volta all'ulteriore **sviluppo** delle attuali capacità del **sistema della ricerca e della catena del valore** nazionale, anche attraverso il potenziamento delle infrastrutture sperimentali e produttive, contribuirà a consolidare ed estendere la capacità di azione di questa nel contesto domestico ed internazionale, in particolare se mirata

- a potenziare quelle capacità grazie alle quali le organizzazioni nazionali sono già riconosciute eccellere, quali la sperimentazione e qualifica di componenti e sistemi prototipali, o la fornitura di grandi componenti e sistemi complessi, così da consentire a queste di aspirare ad una posizione di vera e propria leadership nel mercato;
- a generare una capacità "ridondante", in particolar modo per quei servizi e prodotti che si posizionano sul "percorso critico" di sviluppo e realizzazione di un impianto nucleare, quale forma di consolidamento della catena del valore, in particolare in termini di affidabilità, e dunque di minimizzazione dei rischi associati allo sfioramento dei tempi e dei budget.

Il principio di potenziamento delle capacità di eccellenza già disponibili in Italia potrebbe essere applicato anche relativamente alla necessaria ricerca industriale e alla realizzazione e successivo esercizio di installazioni sperimentali: centralizzando tali azioni, come individuate, priorizzate e definite nei programmi industriali di sviluppo delle filiere e sulla base delle proprie necessità, presso affermate organizzazioni di ricerca (come Siet ed ENEA, riconosciute leader nella sperimentazione a supporto di SMR e LFR, rispettivamente), si consentirebbe di ottimizzare gli sforzi di implementazione e sfruttamento delle installazioni richieste. Ogni necessità puntuale di qualifica di uno specifico componente o sistema potrebbe essere conseguita conducendo una campagna sperimentale

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

dedicata su tali installazioni. Al contempo, le organizzazioni preposte potrebbero incaricarsi di eseguire campagne sperimentali di più ampio respiro ed applicabilità, al fine di approntare dei database di risultati sperimentali di vasto interesse, che potrebbero essere quindi resi accessibili, come forma di trasferimento tecnologico, a tutte le organizzazioni interessate – incluse imprese ed autorità di sicurezza – per la validazione dei propri codici di calcolo.

Il programma nazionale di gestione dei rifiuti radioattivi dovrebbe essere esteso per consentire l'approntamento alla gestione in sicurezza non solo del combustibile esausto – oggi non più generato in Italia – ma anche di un maggior volume di rifiuti a minor intensità e più breve vita. Tale approntamento dovrebbe riguardare le capacità e le infrastrutture necessarie al trattamento, al condizionamento, alla messa in sicurezza e quindi allo smaltimento finale dei rifiuti. Un primo passo in tale direzione dovrebbe essere rappresentato dalla finalizzazione del processo di implementazione del **deposito nazionale per i rifiuti radioattivi**. Essendo, a questo, associato anche un parco tecnologico, sarebbe auspicabile orientare le attività previste in questo già in direzione delle necessità specifiche che possono essere anticipate derivare dalla gestione di un parco di reattori innovativi operante in Italia, quali, oltre alle attività legate al condizionamento del rifiuto finale, anche, e a titolo puramente esemplificativo, la ricerca e lo sviluppo delle tecnologie necessarie al partizionamento e alla trasmutazione del combustibile esausto, a supporto della chiusura del ciclo del combustibile.

Indipendentemente dalla filiera considerata, il nucleare andrebbe ad inserirsi nel mix energetico nazionale al fianco delle fonti rinnovabili. È dunque necessario – pur nei limiti delle incertezze associate alla natura innovativa delle tecnologie considerate – analizzare nel dettaglio il migliore accoppiamento di tali fonti con approfonditi **studi di scenario**, anche a beneficio della valutazione dell'impatto di questa combinazione sul sistema energetico nazionale, perché – stanti le differenti connotazioni tecniche di queste – il potenziale di ciascuna fonte possa essere sfruttato nel miglior modo possibile, supportando al contempo le necessità dell'altra. Tale studio, esteso a tutto il sistema energetico anche al di là della generazione elettrica, dunque ad esempio al campo della cogenerazione di calore di processo, consentirebbe anche di definire in maggior dettaglio, e con riferimento allo specifico contesto nazionale di applicazione, quello che potrebbe essere il reale *business case* degli impianti nucleari, consolidando la stima di impatto sul sistema economico italiano.

Infine, l'**implementazione di una** vasta ed efficace **campagna di comunicazione ed informazione** su tematiche nucleari è considerata un fattore abilitante al lancio stesso, ed alla successiva stabilità nel lungo termine, di un programma nucleare nel Paese.

6-4.1 SMR

Relativamente agli SMR di Generazione III+ e refrigerati ad acqua, tutti i progetti considerati sono accomunati dalla caratteristica di essere sviluppati e condotti da *vendor* stranieri. Per tutti questi, dunque, la connotazione internazionale del progetto è imprescindibile, e deve essere costantemente tenuta in considerazione, anche nell'analisi delle attività necessarie a superare le criticità associate a tali progetti, discusse nella sezione 6-2.1. Il concetto essenziale dell'internazionalizzazione è, peraltro, espresso con l'istituzione stessa dell'iniziativa SMR Industrial Alliance, recentemente avviata a livello europeo.

Alla luce di ciò, ed in termini generali, l'elemento essenziale per consentire di superare le criticità individuate sulla filiera SMR in modo massimamente efficace, è la **partecipazione** del Sistema italiano **al programma di realizzazione del First-of-a-Kind**, assumendo – ragionevolmente e forse opportunamente – che quest'ultima avvenga all'estero. Mediante tale partecipazione, le organizzazioni del Sistema italiano avranno la possibilità di acquisire una posizione di vantaggio, che si estrinseca in due risultati principali:

- la maturazione di esperienze rilevanti, sul campo, i cui frutti si tradurranno in una capacità di contribuire efficacemente alla successiva messa a punto ed implementazione di un programma nazionale per il *First-in-the-Country* (FITC), e a maggior ragione per le unità successive;
- la possibilità di integrarsi nella più ampia *supply chain* internazionale che il *vendor* consoliderà per la realizzazione di tutti gli impianti che intenderà realizzare anche in altri Paesi, estendendo così, per le organizzazioni italiane che vi saranno coinvolte, le opportunità di mercato anche al di là di quelle determinate dal solo contesto nazionale.

Come prima azione attuativa della partecipazione al programma di realizzazione del FOAK, sarà necessario (laddove non già in essere) stabilire un confronto fra il *vendor* e le organizzazioni del Sistema italiano, al fine di individuare le possibili sinergie e complementarità tra le capacità offerte dal Sistema italiano, e quelle già disponibili o individuate dal *vendor*. Oggetto del confronto sarà dunque l'apprezzamento dell'adeguatezza delle competenze, delle infrastrutture sperimentali e delle tecniche e capacità produttive messe a disposizione dal Paese.

Due attività preliminari sono anche riconosciute come propedeutiche a tale confronto:

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- compiere una **mappatura** dettagliata⁹ di tutte le **capacità esistenti e potenzialmente disponibili** nelle organizzazioni italiane coinvolte, e
- individuare una organizzazione che, fungendo da **Integratore di Sistema**, si incarichi, in primo luogo, di coordinare e armonizzare la posizione e l'azione delle diverse organizzazioni coinvolte, al fine di ottimizzare le possibilità di coinvolgimento per ciascuna di queste.

Il confronto fra il *vendor* e le organizzazioni del Sistema italiano dovrà quindi arrivare ad identificare quali azioni, fra quelle richieste a superare le criticità progettuali e quelle necessarie a completare la realizzazione e la dimostrazione di corretto esercizio del FOAK, possano essere affidate al Sistema italiano. Alla luce delle competenze identificate mediante sondaggio tra le organizzazioni che partecipano al GdL 2 (presentate in dettaglio nella successiva sezione C6-3), è possibile anticipare un elevato potenziale, in particolare negli ambiti della sperimentazione – tanto ai fini dello sviluppo quanto della successiva qualifica – di componenti e sistemi (anche su grande scala, e con particolare riguardo ai sistemi di sicurezza passivi); della validazione dei codici di calcolo necessari all'analisi di componenti e sistemi; della progettazione di dettaglio e costruttiva di componenti e sistemi; dell'analisi di sicurezza per l'intero impianto; della fornitura di componenti, strutture, sistemi e servizi associati alla realizzazione ed all'esercizio dell'impianto.

A questi fini, diversi membri del Gruppo di Lavoro hanno indicato l'opportunità di adottare lo strumento degli **accordi quadro** tra le medesime due parti coinvolte (i *vendor* e il Sistema italiano) mediante i quali potrà essere formalizzata e abilitata la fornitura di tali servizi e prodotti da parte delle organizzazioni del Sistema italiano. Anche in questo caso, la presenza di un Integratore di Sistema nazionale potrebbe agevolare la formalizzazione dell'accordo, e massimizzarne il ritorno per il Sistema italiano. Tra i termini da includere nell'accordo quadro, vi è la definizione degli schemi di collaborazione con le altre organizzazioni estere, chiamate dal *vendor* a comporre l'intera *supply chain* richiesta per la costruzione del FOAK e, verosimilmente, delle successive unità, incluse quelle eventualmente prevedibili in Italia.

Dovrà essere garantita una **fornitura di combustibile** affidabile per le unità da realizzarsi in Italia e per l'intera vita operativa di queste, mediante uno specifico accordo tra il *vendor* ed il futuro operatore italiano, o un diverso accordo strategico con un produttore di combustibile qualificato.

Contestualmente, un ulteriore **accordo di collaborazione fra le autorità di sicurezza** nazionale e del paese in cui viene realizzato il FOAK consentirebbe di

⁹ Intendendo, con ciò, ad un livello di dettaglio superiore a quello catturato con i questionari sottoposti ai partecipanti del GdL 2, nonché esteso ad organizzazioni non rappresentate in quest'ultimo.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

promuovere ulteriormente la specializzazione del personale dell'autorità di sicurezza nazionale sulla tecnologia e sul progetto specifico dell'impianto di interesse, nonché di accelerare – in misura maggiore quanto più tempestivo è l'accordo ed ampia la collaborazione – i tempi autorizzativi delle ulteriori unità di cui si prevede realizzazione in Italia.

6-4.2 **AMR (LFR)**

Come illustrato nella prima parte di questo rapporto, la scelta della tecnologia LFR fra quelle di IV Generazione opzionabili per l'implementazione di una filiera AMR in Italia, è stata operata anche in ragione della maggior esperienza maturata su questa tecnologia (relativamente alle altre) da diverse organizzazioni nazionali, coinvolte da oltre 20 anni in attività di ricerca e sviluppo tecnologico. Tale radicata e diffusa esperienza è anche alla base di una riconosciuta posizione di vantaggio, rispetto ad altre nazioni occidentali, sull'obiettivo del dispiego commerciale di una flotta di impianti LFR, determinando di fatto una rivoluzione nella condizione del Sistema italiano che, diversamente dal caso degli SMR, avrebbe la possibilità di agire a supporto di un *vendor* nazionale, e non estero. Ciò non fa venire meno, ovviamente, la necessità di operare, pur con differente ruolo, all'interno di un contesto internazionale, che resta elemento essenziale per lo sviluppo e la diffusione della tecnologia.

Questa diversa condizione, insieme al differente stato di maturità tecnologia delle due filiere, sono le ragioni principali che determinano, per la soluzione delle criticità identificate per la filiera LFR, azioni differenti da quelle richieste per un SMR.

Lo stesso paradigma generale presentato per il caso degli SMR, incentrato su accordi internazionali con gli sviluppatori e produttori di tali reattori, verrebbe sovvertito, richiedendo invece un ulteriore rafforzamento degli **accordi di collaborazione** tra organizzazioni e *vendor* nazionali allo scopo di massimizzare i benefici e non disperdere l'effetto di un eventuale sostegno pubblico allo sviluppo già a partire dall'approntamento all'implementazione del FOAK, nonché di accordi internazionali che consentano di realizzare quest'ultimo all'estero, per non ritardare le tempistiche di approntamento del FITC.

Da qui l'opportunità che in un più vasto piano d'azione per la soluzione delle maggiori criticità derivanti dal minor stato di approntamento della tecnologia, tali accordi, anche in modalità meno estesa (per numero di organizzazioni simultaneamente coinvolte o per ambito di collaborazione), possano essere stretti già nelle fasi antecedenti la realizzazione del FOAK. Questi **accordi preliminari**, che ancor più dovrebbero vedere una partecipazione congiunta della ricerca e dell'industria, consentirebbero anche di agevolare il trasferimento tecnologico a favore dell'industria, anticipando la comprensione delle necessità ed

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

accelerandone il processo di approntamento e di qualifica ad operare su componenti e sistemi aventi disegni, materiali e conseguenti processi lavorativi potenzialmente differenti.

Tra le azioni preliminari necessarie a consentire il dispiegamento di impianti LFR, vi sono la definizione di un **nuovo quadro normativo** – derivato dal medesimo quadro regolatorio – specificamente applicabile alle caratteristiche tecnologiche di questi impianti, inclusivo anche dei codici e degli standard di progettazione nucleare, e l'**estensione delle competenze e capacità dell'autorità di sicurezza nazionale** a tali caratteristiche tecnologiche. In questo caso, non sarebbe possibile mutuare alcuna esperienza pregressa dall'estero; ciò nonostante, la dimensione della collaborazione internazionale resterebbe ancora essenziale, ma in ragione stavolta di una condivisione degli sforzi ed un'accelerazione dei tempi di approntamento del contesto normativo e delle competenze dell'autorità di sicurezza nazionale, nonché per predisporre un contesto regolatorio internazionale, armonizzato già dai suoi albori, grazie al quale rendere più semplice la possibilità di certificare un progetto di LFR ed autorizzarne la costruzione e l'esercizio in qualunque paese coinvolto in questo sforzo internazionale, promuovendo così la possibilità del *vendor* nazionale di esportare il proprio prodotto, e della catena del valore a questo legata di espandere il proprio mercato.

Nelle more di una condivisione della proprietà intellettuale, e dunque sotto la condizione di assicurare la corretta valorizzazione del *know-how* italiano, la medesima rivoluzione potrebbe ancora implicare la possibilità di ricavare rilevanti opportunità da **accordi quadro** internazionali, volti al coinvolgimento strutturato di organizzazioni estere – e in primo luogo europee – nelle fasi di ricerca, sviluppo, qualifica e dimostrazione prima, e di realizzazione ed esercizio poi.

Vi sono eccezioni significative alla particolare rilevanza delle collaborazioni nazionali. La prima è quella determinata dalla necessità di approntare le infrastrutture richieste alla produzione, e possibilmente al riprocessamento, del combustibile nucleare richiesto dagli LFR. Questo, infatti, è di natura differente da quello comunemente impiegato dagli SMR; condizione questa che determina anche l'assenza di una filiera industrializzata già disponibile per la fornitura del combustibile. Allo stesso modo, dovrebbero essere approntate infrastrutture idonee a riprocessare il combustibile LFR al termine del suo impiego in reattore, così da consentire l'implementazione di un ciclo chiuso per mezzo del quale recuperare le componenti riutilizzabili ancora contenute nel combustibile esausto. Per entrambi i processi di fabbricazione e riprocessamento sono disponibili, in Europa, competenze rilevanti che, coinvolte mediante **accordi strategici**, potrebbero consentire di ridurre, anche sensibilmente, i tempi necessari all'approntamento delle infrastrutture richieste. D'altro canto questa impostazione avrebbe un elevato significato anche nel caso della realizzazione di un sistema

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

prototipico di ridotte dimensioni con lo scopo precipuo della qualificazione di nuovi materiali, componenti e combustibile sotto irraggiamento con spettro neutronico veloce. Una macchina, ad oggi assente nel panorama occidentale, con un'alta rilevanza industriale ma anche marcatamente orientata alla ricerca e allo sviluppo strategico nel settore, e i cui obiettivi e costi di realizzazione richiedono naturalmente uno sforzo collettivo preferibilmente supportato da un consorzio internazionale. La dimensione internazionale di tali accordi sarebbe anche coerente con la rilevanza ed il respiro di queste operazioni, che, similmente al caso degli attuali reattori nucleari (e quindi, in prospettiva, degli SMR, che con questi condividono il medesimo ciclo di combustibile), potrebbero essere condotte a livello regionale da pochi, grandi fornitori di servizi.

6-4.3 MR

Il caso posto dai micro-reattori presenta una similitudine di fondo con quello degli SMR: gli sviluppatori della tecnologia sottostante, e dunque i proponenti dei progetti da questa derivati, sono esteri, offrendo al Sistema italiano un ruolo di supporto all'implementazione partecipando alla *supply chain* internazionale. Diversamente però dal caso degli SMR, le competenze e le infrastrutture già disponibili in Italia sono meno trasponibili alle peculiarità e necessità di sviluppo e qualifica della tecnologia MR, riducendo le opportunità delle organizzazioni nazionali di contribuire in modo altrettanto rilevante a tale fase propedeutica. Per ovviare a queste oggettive limitazioni, il *vendor* USNC ha aperto una filiale italiana per poter coinvolgere in modo più efficace alcune realtà industriali italiane al fine di costituire una specifica catena di fornitura. USNC dichiara inoltre l'intenzione di sviluppare in Italia un'attività di ricerca e sviluppo insieme alle organizzazioni partner per le quali auspica un supporto pubblico.

In ragione della similitudine con gli SMR, le medesime azioni elencate nella sezione 6-4.1 possono essere applicabili anche al caso degli MR. Tuttavia, pur considerando quanto più sopra detto, a causa della minore esperienza pregressa delle organizzazioni nazionali (cui consegue o un maggior sforzo, o un minor coinvolgimento), e dell'incertezza sull'effettivo dispiegamento di tali tecnologie in Italia ed in Europa, appare difficile stabilire a priori quale possa essere l'impatto sul sistema italiano.

C6-5 **Prime considerazioni sui costi di ricerca, sviluppo e qualificazione delle soluzioni selezionate**

La valutazione di quello che può essere il costo dell'attività di supporto allo sviluppo dei sistemi nucleari avanzati non è semplice.

Molteplici sono le variabili che influenzano le linee progettuali dei singoli concetti di reattore all'interno delle diverse filiere e plurime sono le incertezze tecniche,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

progettuali e autorizzative che, seppur con diverso grado di complessità, debbono essere affrontate nella linea di sviluppo di questi nuovi reattori.

Nel lavoro del GdL 2 a valle delle valutazioni di quelle che appaiono ai membri del gruppo come le principali criticità associate ai progetti delle diverse filiere, ed avendo cura di selezionare prioritariamente quelle comuni, e dopo aver esaminato e censito la consistenza delle competenze, delle infrastrutture e delle attività di collaborazione in essere, si è tentata una prima valutazione delle necessità economiche in un periodo da qui alla fine dello sviluppo.

Per acquisire i primi elementi sui fabbisogni di risorse finanziarie per la fase preparatoria, diverse strade potevano essere percorse, prima fra tutte quella di una valutazione condotta su basi tecniche da un ristretto comitato a supporto del coordinamento del gruppo.

Data la rilevanza del punto, invece, e considerata la grande rappresentatività nazionale del Gruppo di Lavoro che riunisce sviluppatori industriali, *utilities*, aziende operanti nel campo dell'ingegneria e dello sviluppo componenti, aziende ed enti operanti nel settore della ricerca e sviluppo tecnologica, si è invece considerato un percorso alternativo coinvolgente in maniera attiva i singoli membri.

Si è quindi chiesto, mediante un'opportuna sezione del questionario, quali sono i costi che a livello nazionale ciascuno dei membri del GdL 2 ritiene associabili allo sviluppo delle singole filiere selezionate. In questo senso si è già predefinita una prima batteria di azioni da considerare in queste valutazioni, quali ad esempio la formazione, la ricerca e sviluppo a supporto, la progettazione, la realizzazione di prototipi, la sperimentazione e qualifica di componenti complessi, ma si è lasciata la libertà di aggiungere voci specifiche e quantificarle.

Per ogni filiera selezionata si sono quindi stimati dei costi associati allo sviluppo che possono costituire il riferimento dello sforzo nazionale complessivo, pubblico e privato, verso le filiere in esame e che possono essere considerati il contributo italiano allo sviluppo di questi piccoli sistemi modulari.

Contributo oltremodo significativo non solo perché consente al tessuto industriale e produttivo italiano di attrezzarsi per tempo alla sfida, ma anche perché consente all'Italia di giocare un ruolo da protagonista sia nel settore in cui gli sviluppatori industriali nazionali, Ansaldo Nucleare e *newcleo*, svolgono un ruolo proprietario (AMR-LFR) ma anche nel settore degli SMR ad acqua e degli MR dove la forte presenza di aziende italiane coinvolte può garantire da un lato robusti accordi internazionali sullo sviluppo di concetti di reattore e una significativa partecipazione del tessuto italiano alle forniture relative a tali sistemi.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Se si considera che l'Italia si presenterebbe, nel caso di un ritorno al nucleare basto su queste tecnologie, come uno dei mercati nazionali più rilevanti per questi reattori, si comprende facilmente l'importanza e la redditività paese di questi investimenti.

Ciò detto si analizzano ora le situazioni come emergono per le diverse filiere considerate.

6-5.1 **SMR**

Nei paragrafi precedenti si sono illustrate le principali linee di attività necessarie per questa filiera. Da un punto di vista dello sforzo economico la fascia media si assesta circa fra i 400 e i 600 Milioni di euro, rilasciata principalmente da sviluppatori industriali, *utilites* e sistemi di ricerca (es. Ansaldo Nucleare, Edison, ENEA, Siet). In questo caso un valore di circa il 10% del budget è devoluto ad attività di formazione mentre la quota di progettazione varia dal 25-30% previsto dalle realtà industriali al circa 10% previsto dalle realtà di ricerca. Valori inferiori, circa 100-400 Milioni di euro, sono quotati da alcune aziende attive in settori specifici (quali Nuovo Pignone, Riva Calzoni, SIMIC) mentre alcune aziende molto attive nel settore della produzione di componenti (Walter Tosto, Belleli) sposterebbero verso l'alto l'estremo dell'intervallo analizzato sino a 900-1000 Milioni di euro con poco meno della metà dell'attività, come è naturale, dedicata alla costruzione e qualifica di prodotti e un valore della formazione attorno al 20%.

Significativo il fatto che fra le voci introdotte da alcuni sviluppatori vi siano il *licensing* e la comunicazione, così come l'attività di sviluppo si inquadri in un più ampio contesto di collaborazione internazionale.

6-5.2 **AMR (LFR)**

Nel caso in esame l'orizzonte temporale di dispiegamento di una flotta di reattori, più lungo rispetto agli SMR e con alcuni punti più arretrati nello sviluppo e qualificazione di componenti o per quanto riguarda la fabbricazione del combustibile, rende più incerte le stime del budget necessario. Per contro, però, il forte coinvolgimento di due sviluppatori nazionali (Ansaldo Nucleare e *newcleo*) rende le medesime stime più attendibili e più collegate a dirette realtà ed esperienze progettuali. In questo caso la fascia indicata dai due sviluppatori si colloca fra 700 e 1000 Milioni di euro, mentre nel caso di alcune *utilities* o enti di ricerca (Edison, ENEA, Siet) si oscilla circa fra i 600 e i 700 Milioni di euro. Come nel caso degli SMR, alcune aziende attive nel settore dei componenti (Belleli e Walter Tosto) situano la necessità economica in un intervallo compreso fra i 900 e i 1000 Milioni di euro. Anche qui, come nel caso precedente, alcune *utilities* e aziende esperte nell'ingegneria di sistema (ENEL, SRS, SIMIC, Nuovo Pignone) posizionano,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

invece, le necessità fra i 100 e 400 Milioni di euro. Per questa filiera specifica, inoltre, sono previsti investimenti mirati, primo fra tutti quello per un impianto per la fabbricazione del combustibile. Nel caso di specie Edison valuta un investimento necessario nell'ordine dei 3000 Milioni di euro mentre *newcleo* risulta già impegnata nello sviluppo di questo impianto, di cui stima il costo in 2000 Milioni di euro circa; naturalmente, diversi fattori (fra cui la capacità produttiva) incidono sulla diversa stima. Per quanto riguarda la realizzazione prototipale necessaria, *newcleo* è impegnata nella costruzione di un reattore da irraggiamento ed un FOAK, entrambi in Francia, mentre Ansaldo Nucleare ha in programma, con il consorzio FALCON, la realizzazione di un reattore sperimentale in Belgio e di un reattore prototipico in Romania per la dimostrazione della competitività commerciale del modello. In questo quadro, un reattore da irraggiamento di dimensioni più ridotte ma bene equipaggiato (ad esempio, con celle calde) è necessario per gli sviluppi di medio/lungo termine, che servono per cogliere tutte le potenzialità della filiera LFR, e *newcleo* valuta che il costo di tale impianto si aggiri attorno ai 1000 Milioni di euro, come nel caso del FOAK da essa proposto, mentre la stima dei costi di sviluppo effettuata per entrambe le realizzazioni è attorno ai 2000 Milioni di euro.

6-5.3 MR

In questo caso i dati forniti dai questionari rendono una valutazione univoca più complessa rispetto ai casi precedenti. Lo sviluppatore industriale (USNC) propone un'azione tesa alla realizzazione di tre impianti di ricerca, da installarsi presso università italiane, che complessivamente conduce ad un totale di 500 Milioni di euro. Stessa valutazione, seppur con una attenzione particolare sulla formazione, da parte di alcuni utilizzatori (Duferco). Per l'approntamento della catena del valore associata a questa tecnologia, sono stati stimati investimenti complessivamente pari a 850 Milioni di euro, per far fronte ad un adeguamento industriale specifico (SIMIC) finalizzato alla realizzazione e assemblaggio dei reattori (circa 300 Milioni di euro), e per l'approntamento (MERSEN) di un sistema locato in Italia per la fabbricazione della grafite (circa 550 Milioni di euro).

CAP. 7 - ROADMAP

C7-1 Realizzazione di sistemi prototipali e dei primi reattori di produzione

7-1.1 Contesto temporale di riferimento

Come elaborato, sulla base di indicazioni provenienti in primo luogo dai membri del GdL 2, nella prima parte del documento, relativamente alla definizione delle caratteristiche di riferimento delle filiere analizzate, e limitatamente a quelle successivamente selezionate, la roadmap qui presentata si basa sull'assunto di realizzare (all'estero) un FOAK della tecnologia SMR operativo al 2034, e conseguentemente a ciò di disporre del primo reattore di produzione in Italia (FITC) nel 2036.

In modo analogo, per la tecnologia AMR si è assunta la possibilità di realizzare (nuovamente all'estero) il FOAK di riferimento nel 2037, e quindi di poter realizzare le prime unità in Italia a partire dal 2040.

Per la tecnologia MR, pur registrandone una disponibilità (a livello internazionale) già a partire dal 2030, si è assunto che la prima capacità installata in Italia sia a partire dal 2035.

C7-2 Andamento temporale delle attività industriali e di ricerca e sviluppo per le soluzioni di riferimento

Per consentire il dispiegamento di impianti delle tecnologie selezionate, sono necessarie le azioni descritte nel Cap. 6 -. Stante la mutua dipendenza tra queste, e le tempistiche per la loro implementazione, fissate da criteri di ragionevole rapidità nella ripresa della produzione di energia da fissione, si deriva la roadmap rappresentata in Figura 3.

Tali azioni includono tanto interventi specifici, a supporto di ciascuna delle filiere di interesse, selezionate da questo GdL, quanto interventi trasversali, propedeutici e di supporto a tutte le tecnologie.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

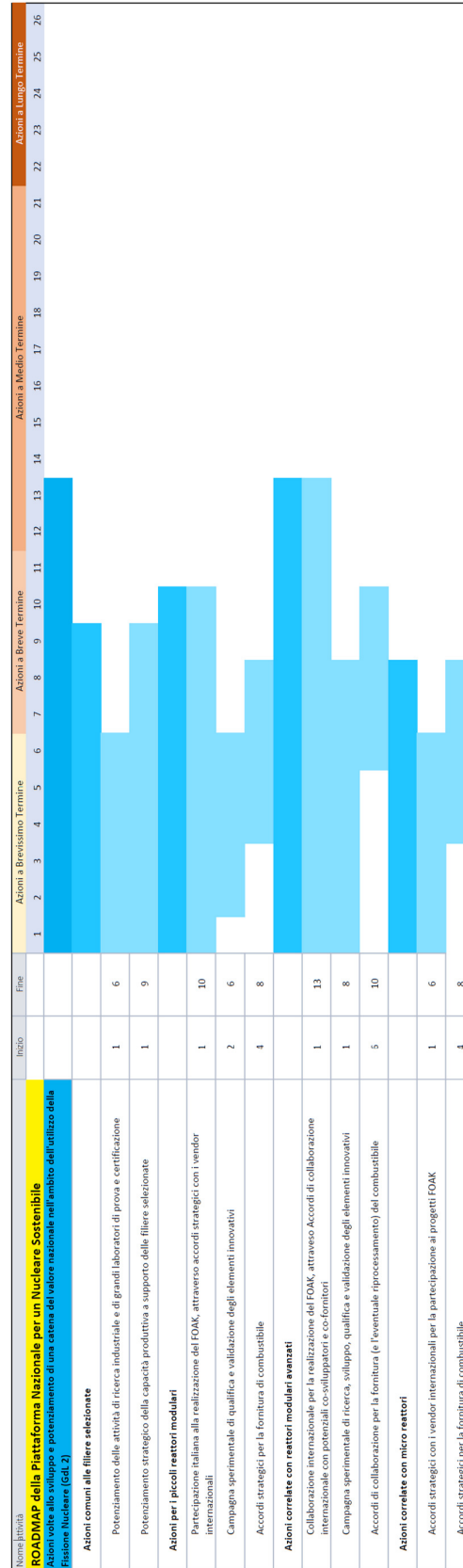


Figura 3. Dettaglio delle azioni volte allo sviluppo e potenziamento di una catena del valore nazionale nell'ambito dell'utilizzo della Fissione Nucleare, come identificate dal GdL 2.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Assumendo al tempo 0 la decisione del Governo di dare seguito all'implementazione di un programma nucleare – elemento necessario e sostanziale per l'intero contesto al quale riferiscono i lavori della Piattaforma – già nel corso del primo anno dovranno essere avviate le azioni trasversali, di potenziamento tanto della capacità produttiva del settore industriale, quanto della capacità di ricerca industriale, da svolgere in stretto collegamento fra l'industria e gli enti di ricerca.

Tali azioni dovranno essere impostate preventivamente, quindi condotte, in perfetto allineamento con le politiche nazionali: per questa ragione, propedeutica a tutto quanto segue appare l'istituzione di un coordinamento, a livello ministeriale, che possa anche rapportarsi con tutte le parti interessate (*stakeholder*).

Il potenziamento della capacità produttiva – necessario a consentire al Sistema italiano di contribuire nella più vasta misura possibile all'implementazione del programma nucleare – deve essere perseguito già durante l'anno 1 dalla decisione del Governo. Funzionale a ciò, è già in corso – in parte, anche ad opera di questo GdL – una ricognizione delle competenze e capacità attualmente disponibili, che consenta di avere chiaro il contesto di riferimento. Appare altresì auspicabile che immediatamente a valle della decisione del Governo, le aziende e le realtà individuate come interessate e competenti in relazione ad una determinata filiera, diano avvio ad un processo organizzativo, al fine di costituire un sistema di rete coerente, connesso e sinergico. Tale processo, da completarsi entro l'anno 2, potrà essere facilitato individuando, già nelle prime fasi, un Integratore di Sistema per ciascuna delle filiere che si intende implementare. Tale Integratore avrà anche un ruolo importante nelle fasi successive, legate alla pianificazione ed implementazione di tutte le azioni necessarie a potenziare tanto le competenze, quanto la capacità produttiva, di tutte le organizzazioni parte del sistema nel suo complesso.

Parte del processo di potenziamento contempla anche la qualifica dei sistemi produttivi e degli operatori agli standard richiesti nel settore nucleare, ex novo, o limitatamente ai processi innovativi che saranno richiesti per rispondere alle necessità previste dal futuro mercato. La seconda azione trasversale, quella di potenziamento delle capacità, e conseguentemente delle attività, di ricerca industriale, dovrà dunque essere perseguita in parallelo, a partire dall'anno 1, per l'approntamento dei grandi laboratori di prova e certificazione necessari allo scopo. L'efficacia di questi grandi laboratori dipenderà anche dalla disponibilità di un corpo legislativo e normativo nazionale, in riferimento al quale possano essere condotte tutte le attività sperimentali di qualificazione e certificazione. Una volta ultimati tali laboratori, entro l'anno 6, le imprese potranno avvalersi delle capacità rese disponibili da questi per condurre tutte le attività richieste ad ultimare il proprio processo di potenziamento entro l'anno 9.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Insieme alle precedenti, sono inoltre necessarie azioni specifiche a supporto di ciascuna delle filiere selezionate. Pur con modalità e grado di coinvolgimento differenti per ciascuna, è in primo luogo necessaria un'azione volta a consolidare la collaborazione internazionale necessaria a predisporre le condizioni per la partecipazione del Sistema italiano alla realizzazione del rispettivo FOAK, che per tutte le filiere è prevista all'estero. Già a partire dall'anno 1 è necessario che il Sistema italiano – opportunamente organizzato come risultante delle prime fasi dell'azione di potenziamento della capacità produttiva – avvii un confronto con i *vendor* internazionali (caso degli SMR ed MR) o con altri partner strategici (caso degli AMR) per la definizione del ruolo che le organizzazioni nazionali, collettivamente e singolarmente, possono svolgere a supporto dei programmi di implementazione del FOAK. Appare evidente, a questo proposito, come l'efficacia nell'organizzazione degli attori del Sistema italiano, ed il potenziamento delle capacità di ricerca industriale, descritti in precedenza, risultino fattori abilitanti per il posizionamento dell'Italia nel contesto internazionale di riferimento con un ruolo di prim'ordine.

Anche a valere sui risultati conseguiti da tali confronti, e sulla base degli accordi stipulati a valle di questi, potranno quindi essere intraprese le specifiche azioni vere e proprie. Nel caso degli SMR ed AMR, tali azioni sono mirate dapprima al supporto dello sviluppo delle tecnologie, mediante attività di progettazione, analisi e qualifiche sperimentali. Per gli SMR, la conduzione generale dei programmi ad opera di *vendor* internazionali determina ragionevolmente un avvio delle attività a partire dall'anno 2; la conclusione è invece prevedibile entro l'anno 6, in virtù del maggior grado di maturità della tecnologia su cui gli SMR si basano. Nel caso degli AMR, invece, la presenza di *vendor* nazionali potrà consentire alle attività di cominciare già durante il primo anno, per poi protrarsi fino all'anno 10, dando così modo di investigare tutti gli aspetti necessari a conseguire l'opportuno grado di maturità tecnologica. In parziale sovrapposizione con le operazioni di ricerca, sviluppo (dove previsto) e qualifica, potranno cominciare anche le azioni mirate alla realizzazione vera e propria dei FOAK. Per queste ultime, le tempistiche per il completamento differiscono per le diverse filiere considerate, arrivando possibilmente fino alle prime fasi di esercizio dei rispettivi FOAK, ed in tempo per la conseguente realizzazione dei FITC che a questi seguiranno, coprendo un orizzonte temporale che va dall'anno 6 (caso degli MR) all'anno 13 (caso degli AMR).

Nel caso dei MR, stante la minore presenza italiana a livello di capacità progettuale di sistema, l'azione da avviare già dal primo anno vede protagoniste le imprese manifatturiere che hanno un potenziale ruolo significativo in tale filiera, e che dovrebbero affrontare con i relativi *vendor* la questione del proprio ruolo nel FOAK. Ipotizzando che tale questione si possa definire entro l'anno 2, potranno partire le attività di potenziamento e supporto necessarie allo specifico scopo di fornitura,

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

che costituirà il concreto contributo italiano alla realizzazione del primo esemplare all'estero.

Tutte le attività di ricerca, sviluppo e qualifica specifiche alle varie filiere di interesse nazionale consentiranno inoltre di supportare adeguatamente le azioni di approntamento di altre infrastrutture nazionali essenziali al rilancio di un programma nazionale [4], prime fra tutte le azioni di riordino del corpo normativo e di adeguamento del sistema di gestione dei rifiuti e di smantellamento degli impianti, temi di competenza rispettivamente dei GdL 4 e 5. Si stressa dunque nuovamente l'importanza di un tavolo di coordinamento nazionale affinché questa mutua influenza possa portare l'auspicato beneficio a tutte le azioni interessate.

L'ultima classe di azioni necessarie all'implementazione del programma nucleare in Italia è relativa alla stipula di accordi strategici atti a garantire la fornitura, da parte di organizzazioni internazionali, di combustibile per i reattori che saranno realizzati in Italia. È ragionevole attendersi che tali accordi vengano stipulati, dai futuri operatori di tali impianti ma con una possibile azione di facilitazione governativa, solo a valle dell'ottenimento dell'autorizzazione alla costruzione dei FITC, dunque con tempistiche vincolate alle azioni, di natura legale e strutturale, che rendano operativo l'organismo preposto al *licensing*; è opportuno però che le azioni propedeutiche alla stipula di tali accordi inizino in anticipo, a partire dall'anno 4-6 a seconda dei casi.

Tutte le azioni sopra elencate potranno trovare adeguata forza d'implementazione solamente se, preliminarmente a queste, il tessuto scolastico, accademico e formativo nazionale sarà stato potenziato, consentendo agli attori del Sistema italiano di reperire risorse umane adeguate in numero e capacità. Le azioni specifiche volte a garantire questa condizione non sono qui descritte, ma demandate alle conclusioni del GdL 6.

C7-3 Quadro finanziario pluriennale a supporto delle attività di sviluppo e qualifica delle filiere selezionate

Nella sezione C6-5 sono state presentate alcune considerazioni preliminari, utili a quantificare l'entità degli investimenti pubblici necessari a predisporre il tessuto nazionale, quindi ad implementare i programmi necessari alla realizzazione dei primi impianti in Italia per ciascuna delle filiere selezionate in questo studio. Complessivamente, tali investimenti possono essere stimati di entità pari a 2 Miliardi di euro. Naturalmente tale contribuzione costituisce parte dello sforzo complessivo messo in atto in questo campo, dove ci si attende investimenti privati del medesimo ordine di grandezza dell'intervento pubblico.

La combinazione di investimenti pubblici e privati servirà ad alimentare in primo luogo le attività, trasversali alle filiere selezionate, a supporto dell'approntamento

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

del Sistema italiano, quali il potenziamento della capacità produttiva e della ricerca industriale. Poiché entrambe, nell'ottica di massimizzare le sinergie del Sistema, necessitano preliminarmente di un processo di mappatura ed organizzazione, previsto in entrambi i casi durante il primo anno dopo la decisione del Governo di perseguire un rilancio dell'opzione nucleare in Italia, è ragionevole attendersi una distribuzione pluriennale degli investimenti caratterizzata da un maggiore sforzo negli anni da 2 a 5, per consentire l'approntamento di tutte le nuove installazioni, modifiche ed adeguamenti necessari all'obiettivo. L'investimento potrà quindi essere ridotto negli anni successivi, caratterizzati dalla progressiva entrata in funzione dei sistemi produttivi e sperimentali.

Per contro, gli investimenti legati alla conduzione dei programmi di ricerca, sviluppo e qualifica a supporto delle specifiche filiere di interesse possono orientativamente essere considerati come ugualmente distribuiti nel corso degli anni, se non, invece, progressivamente crescenti, coerentemente con la maggior complessità delle prove di qualifica, rispetto a quelle di sviluppo e, ancor più, di ricerca, la maggior complessità essendo dettata dall'aumento delle dimensioni dei sistemi e componenti da qualificare (rispetto ai modelli semplificati impiegati nelle campagne di ricerca), e dalle condizioni operative delle prove, sempre più rappresentativi delle condizioni presentate dall'esercizio di un reattore.

Considerando dunque l'orizzonte temporale previsto per la realizzazione dei programmi relativi all'implementazione delle filiere qui selezionate, compreso entro i 10 ÷ 13 anni dalla decisione del Governo di perseguire l'opzione nucleare in Italia (tempo 0), si può immaginare la necessità di un investimento medio pari a **160 ÷ 200 Milioni di euro all'anno**. È importante puntualizzare come questa valutazione, che ad oggi può assumere solo le caratteristiche di una determinazione media sulla base delle considerazioni più sopra riportate, non possa scendere in un più ampio dettaglio temporale degli investimenti specifici, necessitando della definizione di alcune scelte operative che dovranno essere assunte nell'immediato futuro, in fase di avvio del programma.

CAP. 8 - LINEE GUIDA

Scopo di questo capitolo è quello di fornire un sommario organico delle linee guida che sono emerse nel corso del lavoro del GdL 2, condotto all'interno della Piattaforma Nazionale per un Nucleare Sostenibile, da perseguire nell'ambito delle attività di ripresa della produzione di energia per via nucleare in Italia utilizzando tecnologie innovative.

Da un punto di vista tecnico il lavoro della Piattaforma di saggiare la "possibile ripresa dell'utilizzo dell'energia nucleare in Italia attraverso le nuove tecnologie nucleari sostenibili in corso di sviluppo" ha dato esito positivo.

Il lavoro svolto ha indicato **nello sviluppo di soluzioni innovative** relative alle filiere tecnologiche Small Modular Reactor – SMR, Micro Reactor – MR, e Advanced Modular Reactor – AMR di quarta generazione, attualmente in fase dimostrativa e prototipale, **una soluzione tecnica possibile** per concorrere, in combinazione con le fonti programmabili ed in ottica di decarbonizzazione, al bilancio energetico di **medio termine del Paese (2030-2050)**.

Tale soluzione nei tempi e nei modi **si può contemperare** anche con l'opportunità di creare e sostenere **in Italia una filiera industriale e produttiva** a supporto di queste nuove tecnologie **a patto di focalizzare**, e non disperdere, gli sforzi di sviluppo.

L'esame delle realtà italiane impegnate nel settore dell'energia nucleare ha rivelato un comparto molto attivo e vivace, con la copertura di quasi tutte le fasi progettuali e realizzative, dall'ingegneria di sistema alla fabbricazione di componenti, dalle attività di ricerca a quelle di formazione universitaria, con un grado di coinvolgimento in progetti internazionali che si può valutare come medio-alto: l'elevato numero di partecipanti qualificati al GdL 2 della Piattaforma ne è testimonianza.

Ciò ha consentito, oltre ad un'adeguata analisi tecnica delle soluzioni proposte ed una prima ampia mappatura delle competenze nazionali di settore, anche la definizione di una roadmap temporale credibile e una quantificazione degli sforzi economici per le fasi sviluppo dei sistemi in oggetto.

Da quest'ultima emerge chiaramente come nell'orizzonte compreso entro i 10 ÷ 13 anni dall'avvio delle attività tese allo sviluppo di quei sistemi innovativi, **l'investimento pubblico**, stimato pari a circa 2 Miliardi di euro, sia una **frazione di quello totale** e risulti **accompagnato da investimenti privati** quantomeno del medesimo ordine di grandezza dell'intervento pubblico.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

In aggiunta a ciò, in questo capitolo intendiamo fornire alcuni spunti, sintetici ed essenziali, su azioni necessarie emerse dall'ampia platea del GdL 2 nel corso delle elaborazioni condotte; spunti che occorre siano tenuti nel debito conto e se del caso approfonditi.

L'elenco delle azioni/riflessioni è di seguito presentato secondo un ordine che non è necessariamente cronologico (diverse azioni possono essere svolte in parallelo), ma è piuttosto di tipo logico (in diversi casi, le azioni che seguono sono rese fattibili e/o efficaci da alcune di quelle che le precedono).

- Definire una **politica chiara** riguardante il mix energetico del Paese, ed assumere un **impegno stabile e di lungo termine** in merito all'inclusione in questo della fonte nucleare. Tale azione rappresenta un prerequisito essenziale ed imprescindibile, **senza il quale un programma nucleare non può sussistere**, o rischia di impegnare risorse finanziarie e umane preziose in azioni di ricerca, sviluppo, qualificazione di componenti e sistemi, senza poter trarre il massimo vantaggio dagli sforzi profusi.
- Dotarsi di un **sistema di coordinamento** a livello ministeriale ed eventualmente interministeriale, ed istituire un **tavolo di consultazione** delle parti interessate, mantenendo anche attiva una **rete di settore** sul modello di quella costituita in questi ultimi mesi.
- Adottare schemi di **collaborazione pubblico - privato**, conseguendo in questo modo una serie di importanti vantaggi:
 - condivisione del rischio degli investimenti;
 - mobilitazione delle migliori competenze, ovunque si trovino ad operare;
 - bilanciamento fra l'iniziativa privata e l'interesse sociale che, visti anche i rilevanti investimenti necessari, deve essere adeguatamente tutelato.
- L'efficienza ed efficacia del futuro programma nucleare richiede la **concentrazione delle forze su pochi progetti, da replicare su un numero relativamente elevato di esemplari**. Tale criterio favorisce, inoltre, l'aggregazione dei diversi soggetti attivi e l'identificazione di poche aziende, di struttura e dimensioni adeguate, in grado di assumere ruoli di capofila. A questi fini risulta necessaria, anche se non sufficiente, la scelta delle tre filiere, e per questo, onde evitare una dispersione di sforzi e risorse, occorre ulteriormente **concentrarsi su alcuni progetti standardizzati**, da selezionare **su base competitiva, in modo trasparente e a fronte di criteri ben definiti**, di seguito identificati:
 - **grado di maturità**: la scelta di tecnologie mature minimizza rischi tecnici e tempi di sviluppo e dispiegamento;
 - **sostenibilità**, da intendersi soprattutto come la minimizzazione dello sfruttamento delle **risorse naturali** e dell'impatto dei **rifiuti a vita lunga**;

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

- valorizzazione delle **competenze e delle capacità industriali italiane**, al fine di massimizzare sia l'autonomia tecnologica sia le ricadute produttive e occupazionali;
- **competitività economica** (LCOE minimo), al fine di massimizzare i benefici sociali (contenimento del costo dell'energia).
- Per ciascuno dei progetti selezionati, definire **programmi di ricerca applicata, sviluppo industriale, test di qualificazione strettamente necessari** alle attività di progettazione, *licensing*, realizzazione di componenti e sistemi, pianificazione ed esecuzione delle realizzazioni, indentificando con chiarezza, ma con i necessari margini di flessibilità, **azioni, tempi, costi, responsabilità, momenti di verifica**. Orientare il supporto pubblico verso modalità attuative che favoriscano l'aggregazione dei soggetti partecipanti ai programmi di supporto messi in campo.
- Stipulare **accordi strategici con altri Paesi**, operando in parallelo **sui due livelli, istituzionale e aziendale**, nell'ambito dei quali sia possibile attivare collaborazioni per lo sviluppo di progetti, in Italia e in altri Paesi, limitatamente a quei Paesi coinvolti nello sviluppo di tecnologie incluse fra le filiere selezionate, e candidati a realizzare il FOAK di queste. Tali accordi consentirebbero all'industria di accelerare l'approntamento, ed estendere le capacità, della catena del valore italiana, così da acquisire un ruolo quanto più possibile rilevante, a beneficio della realizzazione degli impianti nazionali. In questo ambito, particolare attenzione dovrà essere riservata al **ciclo del combustibile nucleare**.
- Definire le **modalità di cooperazione pubblico-privato per rendere finanziabile l'installazione** dei sistemi di produzione in Italia. Gli schemi, anche ispirandosi ad esperienze internazionali, possono coinvolgere più soggetti (progettisti/costruttori di impianti, *utilities* in grado di esercirli, utilizzatori dell'energia), con lo Stato che potrebbe operare con diverse modalità, da selezionare, rispetto ai rischi che possono rendere problematici gli investimenti (aspetto di rilevante importanza per una tecnologia caratterizzata da forte intensità di capitale e da vita tecnica lunga).

BIBLIOGRAFIA

- [1] International Atomic Energy Agency. *Advanced Reactors Information System (ARIS)*. Accessibile online all'indirizzo <https://aris.iaea.org/>.
- [2] Nuclear Energy Agency. *The NEA Small Modular Reactor Dashboard: Second edition*. OECD Publishing, Paris, 2024. Accessibile online all'indirizzo https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_90816/the-nea-small-modular-reactor-dashboard-second-edition.
- [3] International Atomic Energy Agency. *Advances in Small Modular Reactor Technology Developments - A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), 2022 Edition*. Accessibile online all'indirizzo https://aris.iaea.org/Publications/SMR_booklet_2022.pdf.
- [4] International Atomic Energy Agency. *Milestones in the Development of a National Infrastructure for Nuclear Power*. Nuclear Energy Series No. NG-G-3.1 (Rev.2), ISBN 978-92-0-150223-0, DOI: 10.61092/iaea.zjau-e8cs.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Allegato A Schede tecniche delle filiere considerate

Nel seguito sono riportate le schede tecniche elaborate dai membri del GdL 2 per ciascuna delle filiere considerate nel presente rapporto.

Insieme ai valori di riferimento, qui rappresentati, si riporta anche – ai fini di una corretta valutazione anche economica delle analisi di scenario che saranno condotte dal GdL 1 sulla base di tali dati – una stima dell’incertezza associata a tali indicazioni. Per la stima, si è fatto riferimento ad uno standard^h e ad una pratica raccomandataⁱ internazionali per attribuire gli intervalli di confidenza associati, e le relative incertezze. Nello specifico, si è fatto riferimento allo schema sotto riportato.

Classe AACE	Classificazione ANSI	Stato	Intervallo atteso di accuratezza	
			Estremo inferiore del costo reale atteso	Estremo superiore del costo reale atteso
Classe 5	Ordine di grandezza	Embrionale	-50% ÷ -20%	+30% ÷ +100%
Classe 4		Concettuale	-30% ÷ -15%	+20% ÷ +50%
Classe 3	Budgettaria	Base	-20% ÷ -10%	+10% ÷ +30%
Classe 2	Definitiva	Avanzato	-15% ÷ -5%	+5% ÷ +20%
Classe 1		Dettaglio	-10% ÷ -3%	+3% ÷ +15%

Per l’attribuzione della classe di pertinenza, si è fatto riferimento ai valori attribuiti per i diversi indicatori di maturità, selezionati in base alla voce di costo cui applicare i corrispondenti intervalli di accuratezza, come segue:

- per il costo di investimento “overnight”: maturità della tecnologia, del design e della filiera produttiva;
- per il costo del combustibile: maturità della filiera del combustibile.

I criteri di conversione applicati sono riportati nella successiva tabella.

Classe AACE	Maturità			
	della tecnologia	del design	della filiera produttiva	della filiera del combustibile
Classe 5	1 ÷ 4	1	1	1 ÷ 2
Classe 4	5 ÷ 6	2	2	2 ÷ 3
Classe 3	7	3	3	4
Classe 2	8	4	4	5
Classe 1	9	5	5	6

^h ASTM International. Standard Classification for Cost Estimate Classification System. Standard E2516-11 (2019).

ⁱ AACE International. Cost Estimate Classification System – As applied in engineering, procurement, and construction for the process industries. Recommended Practice 18R-97 (2020).

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Mentre l'individuazione della classe ACE per la valutazione dell'accuratezza del costo del combustibile è direttamente ricavata dall'unico indicatore utilizzato, quella per la valutazione dell'accuratezza del costo "overnight", in ragione dei tre indicatori utilizzati, è effettuata arrotondando all'intero più prossimo il valore ottenuto dalla media delle tre differenti stime.

Infine, data l'ampiezza dei range di variabilità degli estremi dell'intervallo di accuratezza per ciascuna classe ACE, si è fissato un unico valore di riferimento basandosi sulla fonte dalla quale sono stati reperiti i valori degli indicatori di maturità impiegati nell'attribuzione della classe di appartenenza^j, secondo il criterio seguente:

- per valori comunicati da membri della piattaforma ("C"), si è preso il valore intermedio dell'intervallo proposto;
- per valori reperiti da letteratura ("L"), si è preso l'estremo massimo dell'intervallo proposto;
- per valori frutto di valutazione ("V"), si è preso un valore intermedio tra i precedenti due.

Si precisa, in ultimo, che le indicazioni riportate a valle di ciascuna scheda e relative alla capacità di realizzazione, si intendono riferite al contesto italiano.

^j Si richiama la logica con cui sono stati selezionati i valori di riferimento, sulla base di comunicazioni dai membri della piattaforma ("C"), da letteratura ("L") o da valutazione ("V"), come riportato nelle tabelle seguenti a lato di ogni valore.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.1 Scheda SMR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	2 ÷ 4	3.5 (C)
durata della vita tecnica	anni	40 ÷ 80	60 (C,V)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	4.4 ÷ 10	5 (C,V) ^(-15%) _(+20%)
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}		
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno		0.145 ^k (C,V)
variabili	€/MWh _{th}		^l
costo del combustibile	€/MWh _{th}	3 ÷ 4	3.5 (C,V) ^(-10%) _(+15%)
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno		
tasso di indisponibilità			
per ricarica	ore/anno	120 ÷ 170	540 (C,V)
per manutenzione	ore/anno		
per guasto	ore/anno	50 ÷ 100	75 (C,V)
potenza			
nominale	MW _{th}	300 ÷ 1080	1080 (C)
	MW _{el}	100 ÷ 340	340 (C)
massima	MW _{th}	100 ÷ 1276	1080 (C)
minimo tecnico	MW _{th}		216 (C)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%		
netta	%	28.5 – 34	32 (C)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	7 ÷ 9	8 (C)
del design	#	2 ÷ 5	3 (C)
del licensing	#	2 ÷ 5	2 (C)
di un dimostratore/prototipo ^m	#	-	n.a.
della filiera produttiva	#	3 ÷ 5	3 (C,V)
della filiera del combustibile	#	4 ÷ 6	4 (L)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2030 ÷ 2036	2034 (C,V)
Nth-of-a-Kind	anno	> 2035	2036 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	n.a.	
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	

^k L'indicazione riportata (in M€/MW_{th}/anno) comprende tanto la quota fissa quanto quella variabile dei costi di operazione e manutenzione.

^l Incluso nel precedente.

^m Laddove previsto/richiesto.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

velocità di rampa	%/min	5.0 ÷ 8.5	5.0 ÷ 8.5 (C)
costi			
startup	M€		Non rilevante
shutdown	M€		Non rilevante
consumi			
startup	MWh _{th}		Non rilevante
shutdown	MWh _{th}		Non rilevante
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	< 300	250 (C,V)
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta ⁿ	p.u.		~ 0.3 (C)
Sicurezza			
approccio	--	attivo/passivo	passivo
"grace period"	giorni	>3	>3
emergency planning zone	km	0.5 ÷ 2	(entro il sito) (C)
Sostenibilità			
combustibile	--	UO2	UO2
arricchimento	%	2,5 ÷ 5	<5
burn-up	MWd/kg	24 ÷ 60	45 (C,V)
ciclo	--	aperto	aperto

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	2 (C)	7 ÷ 12 (C)	12 ÷ 22 (C)	22 ÷ 42 (C)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

ⁿ Mancata produzione di energia elettrica per unità di energia termica estratta.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2 Schede AMR

A.2.1 Scheda GFR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	3,5	3,5 (L)
durata della vita tecnica	anni	60	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	5,2	5,2 (L) $\left(\begin{smallmatrix} -50\% \\ +100\% \end{smallmatrix}\right)$
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}		
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	
costo del combustibile	€/MWh _{th}	4,3	4,3 (L) $\left(\begin{smallmatrix} -50\% \\ +100\% \end{smallmatrix}\right)$
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno		
tasso di indisponibilità			
per ricarica	ore/anno	2	2 (L)
per manutenzione	ore/anno	18	18 (L)
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	500	500 (L)
	MW _{el}	210	210 (L)
massima	MW _{th}	n.a.	500 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	50	50 (L)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	45%	45% (V)
netta	%	42%	42% (V)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	1 ÷ 3	2 (V)
del design	#	1 ÷ 2	2 (V)
del licensing	#	1 ÷ 2	1 (V)
di un dimostratore/prototipo	#	1	1 (V)
della filiera produttiva	#	n.a.	0 (V)
della filiera del combustibile	#	n.a.	0 (V)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	n.a.	2050 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	n.a.	2054 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	n.a.	
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	8	8 (L)
costi			

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	
consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	750	750
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	
Sicurezza			
approccio	--	attivo/passivo	attivo/passivo (L)
"grace period"	giorni	3	3 (L)
emergency planning zone	km	16	16 (L)
Sostenibilità			
combustibile	--	UC	UC (L)
arricchimento	%	7	7 (L)
burn-up	MWd/kg	143	140 (L)
ciclo	--	n.a.	chiuso (V)

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	0 (V)	0 (V)	0 (V)	0 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2.2 Scheda LFR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	3,5 ÷ 5	4 (V)
durata della vita tecnica	anni	60	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	4 ÷ 4,13	4 (C,V) ^(-25%) _(+40%)
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}		
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	0,133 (V)
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	0,9 (V)
costo del combustibile	€/MWh _{th}	n.a.	4 (V) ^(-25%) _(+40%)
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno		
tasso di indisponibilità		10%	10%
per ricarica	ore/anno	n.a.	
per manutenzione	ore/anno	n.a.	
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	300 ÷ 960	960 (C)
	MW _{el}	125 ÷ 450	410 (C)
massima	MW _{th}		1056 (C)
minimo tecnico	MW _{th}	30 ÷ 340	192 (C)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	44,0 ÷ 47,0	44,8 (C)
netta	%	42,0 ÷ 45,0	42,5 (C)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	4 ÷ 6	5 (V)
del design	#	2 ÷ 3	2 (C)
del licensing	#	2	2 (C)
di un dimostratore/prototipo	#	2	2 (C)
della filiera produttiva	#	2	2 (C)
della filiera del combustibile	#	1 ÷ 3	2 (C)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2033 ÷ 2040	2037 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	2035 ÷ 2045	2040 ^o (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	6 ÷ 24	15 (V)
shutdown	ore	2 ÷ 4	3 (V)
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	5 ÷ 12,5	10
costi			

^o Il valore qui riportato si riferisce ad una media stimata tra due diverse indicazioni espresse da due membri del GdL 2.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	
consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	500	500 (C)
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	0,418 (L)
Sicurezza			
approccio	--	attivo/passivo	attivo/passivo
"grace period"	giorni	7 ÷ infiniti	infiniti (C)
emergency planning zone	km	(entro il sito)	(entro il sito) (C)
Sostenibilità			
combustibile	--	UO2, MOX, UN	MOX
arricchimento	%	15 ÷ 30	20 (C)
burn-up	MWd/kg	80 ÷ 140	100 (C)
ciclo	--	aperto/chiuso	chiuso

Capacità di realizzazione^P:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	0 (V)	3 (V)	6 (V)	12 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

^P Un'azienda che sviluppa sistemi LFR comunica che, a suo parere, la disponibilità del primo impianto potrebbe essere anticipata al 2035, e che, al 2050, la capacità realizzativa potrebbe ammontare a 40 unità.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2.3 Scheda MSR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	2 ÷ 3	5 (V)
durata della vita tecnica	anni	30 ÷ 80	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	2,54 ÷ 11,33	7 (L) $\left(\begin{smallmatrix} -50\% \\ +100\% \end{smallmatrix}\right)$
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}	n.a.	
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	
costo del combustibile	€/MWh _{th}	2,39 ÷ 5,98	6 (L) $\left(\begin{smallmatrix} -50\% \\ +100\% \end{smallmatrix}\right)$
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno	n.a.	
tasso di indisponibilità			
per ricarica	ore/anno	876	876 (L)
per manutenzione	ore/anno	n.a.	
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	80 ÷ 3000	400 (L)
	MW _{el}	33 ÷ 2000	185 (L)
massima	MW _{th}	n.a.	400 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	n.a.	
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	n.a.	
netta	%	42 ÷ 66	46 (L)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	1 ÷ 3	2 (V)
del design	#	1	1 (L)
del licensing	#	1 ÷ 2	1 (V)
di un dimostratore/prototipo	#	n.a.	
della filiera produttiva	#	1 ÷ 4	2 (V)
della filiera del combustibile	#	1 ÷ 2	1 (V)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2025, >2050	>2050 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	n.a.	
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	n.a.	
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	5 ÷ 10	10% (V)
costi			
startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	585 ÷ 900	700 (L)
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	
Sicurezza			
approccio	--	passivo	passivo (L)
"grace period"	giorni	infiniti	infiniti (V)
emergency planning zone	km	0,5	1 (V)
Sostenibilità			
combustibile	--	(vari)	UF4 (L)
arricchimento	%	2 ÷ 19,8	19 (L)
burn-up	MWd/kg	29 ÷ 509	29 (L)
ciclo	--	aperto/chiuso	aperto

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	0 (V)	0 (V)	0 (V)	0 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2.4 Scheda SCWR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	n.a.	
durata della vita tecnica	anni	60	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	q	4 (V) $\left(\begin{smallmatrix} -50\% \\ +100\% \end{smallmatrix}\right)$
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}	n.a.	
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	
costo del combustibile	€/MWh _{th}	n.a.	3.5 (V) $\left(\begin{smallmatrix} -15\% \\ +20\% \end{smallmatrix}\right)$
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno		
tasso di indisponibilità		9 ÷ 10	10 (L)
per ricarica	ore/anno	n.a.	
per manutenzione	ore/anno	n.a.	
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	2300 ÷ 3681	2300 (L)
	MW _{el}	1000 ÷ 1620	1000
massima	MW _{th}	n.a.	2300 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	n.a.	
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	n.a.	
netta	%	43,5 ÷ 44	43,5 (L)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	2	2 (L)
del design	#	2	2 (L)
del licensing	#	1	1 (L)
di un dimostratore/prototipo	#	n.a.	
della filiera produttiva	#	n.a.	
della filiera del combustibile	#	1 ÷ 4	4 (V)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	n.a.	2045 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	n.a.	2048 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	n.a.	
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	n.a.	
costi			

^q Viene vantato un risparmio economico del 20% rispetto al costo dei più tradizionali grandi reattori ad acqua leggera.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	
consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	n.a.	
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	
Sicurezza			
approccio	--	attivo/passivo	attivo/passivo
"grace period"	giorni	3	3 (L)
emergency planning zone	km	n.a.	(come per LWR) (V)
Sostenibilità			
combustibile	--	UO2	UO2 (L)
arricchimento	%	6,2 ÷ 9	9 (L)
burn-up	MWd/kg	45 ÷ 60	60 (L)
ciclo	--	aperto	aperto

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	0 (V)	0 (V)	1 (V)	3 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2.5 Scheda SFR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	6	6 (L)
durata della vita tecnica	anni	60	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	8	8 (L) $\left(\begin{smallmatrix} -\% \\ +\% \end{smallmatrix}\right)$
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}	n.a.	
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	
costo del combustibile	€/MWh _{th}	n.a.	4 (V) $\left(\begin{smallmatrix} -25\% \\ +40\% \end{smallmatrix}\right)$
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno	n.a.	
tasso di indisponibilità		20 ÷ 30%	25% (V)
per ricarica	ore/anno	n.a.	
per manutenzione	ore/anno	n.a.	
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	1500	1500 (L)
	MW _{el}	600	600 (L)
massima	MW _{th}	n.a.	1500 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	300	300 (L)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	n.a.	41,3 (V)
netta	%	40	40 (L)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	7 ÷ 9	7 (V)
del design	#	2 ÷ 3	3 (L)
del licensing	#	1 ÷ 2	2 (L)
di un dimostratore/prototipo	#	6	6 (L)
della filiera produttiva	#	2 ÷ 4	2 (L)
della filiera del combustibile	#	2 ÷ 3	2 (V)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2030 ÷ 2050	2030 (L)
Nth-of-a-Kind	anno	2040 ÷ 2070	2033 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	28	28 (L)
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	5	5 (L)
costi			
startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	530	530 (L)
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	
Sicurezza			
approccio	--	attivo/passivo	attivo/passivo
"grace period"	giorni	3	3 (L)
emergency planning zone	km	(come per LWR)	(come per LWR)
Sostenibilità			
combustibile	--	UO ₂ , MOX	MOX (L)
arricchimento	%	15 ÷ 30	17,5 (L)
burn-up	MWd/kg	80 ÷ 150	120 (L)
ciclo	--	aperto/chiuso	chiuso

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	1 (V)	2 (V)	4 (V)	7 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.2.6 Scheda VHTR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	4 ÷ 6	5 (V)
durata della vita tecnica	anni	40 ÷ 80	60 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	4,66 ÷ 8,51	7 (L) ^(-20%) _(+30%)
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}	n.a.	
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	n.a.	0,1316 (L)
variabili	€/MWh _{th}	n.a.	10,47 (L)
costo del combustibile	€/MWh _{th}	n.a.	9,34 (L) ^(-30%) _(+50%)
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno	2 ÷ 3,3	2,70 (L)
tasso di indisponibilità			
per ricarica	ore/anno	0 ÷ 700	490 (L,V)
per manutenzione	ore/anno	430 ÷ 440	435 (V)
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	150 ÷ 625	600 (L)
	MW _{el}	50 ÷ 315	300
massima	MW _{th}	n.a.	600 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	80 ÷ 240	240 (L)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	35 ÷ 51	51 (L)
netta	%	32 ÷ 50	50 (L)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	5 ÷ 9	8 (V)
del design	#	1 ÷ 6	3 (L)
del licensing	#	1 ÷ 6	2 (L)
di un dimostratore/prototipo	#	0 ÷ 6	6 (L,V)
della filiera produttiva	#	2 ÷ 4	2 (L)
della filiera del combustibile	#	1 ÷ 4	1 (L)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2035 ÷ 2045	2039 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	n.a.	2042 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	n.a.	
shutdown	ore	n.a.	
minima permanenza in servizio	ore	n.a.	
velocità di rampa	%/min	2,5 ÷ 10	2,5 (L)
costi			
startup	M€	n.a.	
shutdown	M€	n.a.	

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	530 ÷ 1200	900
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	0 (L)
massimo	p.u.	1 ÷ 14,85	14,85 (L)
valore coefficiente Beta	p.u.	0,5727	0,5727 (L)
Sicurezza			
approccio	--		attivo/passivo
"grace period"	giorni	7	7 (L)
emergency planning zone	km	(entro il sito)	(entro il sito) (L)
Sostenibilità			
combustibile	--	TRISO	TRISO (blocchi)
arricchimento	%	8,5 ÷ 19,75	14,0 (L)
burn-up	MWd/kg	60 ÷ 165	120 (L)
ciclo	--	aperto	aperto

Capacità di realizzazione:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	0 (V)	1 (V)	5 (V)	10 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

A.3 Scheda MR

Parametro	Unità	Valore	
		Range	Riferimento
Economicità			
tempo stimato di costruzione di un impianto	anni	1 ÷ 4	3 (L)
durata della vita tecnica	anni	15 ÷ 50	30 (L)
costo di investimento			
overnight	M€/MW _{el}	2 ÷ 10	7 (L,V) ^(-15%) _(+25%)
interessi durante la costruzione	M€/MW _{el}	n.a.	
costi di O&M			
fissi	M€/MW _{th} /anno	<2	0,26 ^r (L,V)
variabili	€/MWh _{th}	10 ÷ 180	0,75 (L,V)
costo del combustibile	€/MWh _{th}	10 ÷ 40	14,4 (C) ^(-25%) _(+40%)
accantonamento per costi decommissioning	M€/anno	0,1	0,1 (L,V)
tasso di indisponibilità			
per ricarica	ore/anno	0 ÷ 168	168 (C)
per manutenzione	ore/anno	0 ÷ 100	100 (C)
per guasto	ore/anno	n.a.	
potenza			
nominale	MW _{th}	3 ÷ 50	15 (L)
	MW _{el}	0 ÷ 22,5	5,25 (L,C)
massima	MW _{th}	n.a.	15 (V)
minimo tecnico	MW _{th}	6 ÷ 10	6 (L,C)
efficienza in funzione della potenza generata			
lorda	%	2 ÷ 45	36 (L,V)
netta	%	2 ÷ 45	35 (L,C)
Fattibilità			
maturità			
della tecnologia	#	2 ÷ 8	7 (L)
del design	#	1 ÷ 3	2 (C)
del licensing	#	0 ÷ 3	2 (C)
di un dimostratore/prototipo	#	0 ÷ 6	1 (L)
della filiera produttiva	#	2 ÷ 4	2 (C)
della filiera del combustibile	#	2 ÷ 5	3 (C)
periodo di disponibilità			
First-of-a-Kind	anno	2026 ÷ 2040	2030 (V)
Nth-of-a-Kind	anno	2030 ÷ 2045	2032 (V)
Operabilità			
flessibilità			
tempi			
startup	ore	0,1 ÷ 1	0,2 (C)
shutdown	ore	0,1 ÷ 1	0,2 (C)
minima permanenza in servizio	ore	1	1 (C)
velocità di rampa	%/min	0,5 ÷ 15	5 (L,C)

^r Stima effettuata a partire dal valore minimo reperito in letteratura, e per considerazioni di effetti di scala in relazione agli analoghi costi riportati per altre filiere. Il valore si riferisce a impianto con singolo reattore; nel caso di unità multiple, potrebbero essere applicabili riduzioni al valore qui riportato.

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

costi			
startup	M€	n.a.	0 (C)
shutdown	M€	n.a.	0 (C)
consumi			
startup	MWh _{th}	n.a.	
shutdown	MWh _{th}	n.a.	
cogenerazione			
massima temperatura del calore disponibile	°C	330 ÷ 900	330 (V)
rapporto produzione calore/elettricità			
fisso	p.u.	n.a.	
minimo	p.u.	n.a.	
massimo	p.u.	n.a.	1,5 (V)
valore coefficiente Beta	p.u.	n.a.	
Sicurezza			
approccio	--	passivo	passivo
"grace period"	giorni	1 ÷ infiniti	7 (L)
emergency planning zone	km	(entro il sito)	(entro il sito) (L)
Sostenibilità			
combustibile	--	TRISO	TRISO
arricchimento	%	2 ÷ 19,75	19,75 (L)
burn-up	MWd/kg	1 ÷ 210	70 (L)
ciclo	--	aperto	aperto

Capacità di realizzazione^s:

	2035	2040	2045	2050
Unità disponibili al	25 (V)	50 (V)	75 (V)	100 (V)

Dettaglio dei flussi finanziari nel periodo di costruzione:

assunto lineare

^s Un'azienda che sviluppa sistemi MR comunica che, a suo parere, i dati di disponibilità dei relativi impianti, rispetto a quanto riportato in tabella, potrebbero essere intesi come per anno (es: al 2050, 100 unità all'anno).

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

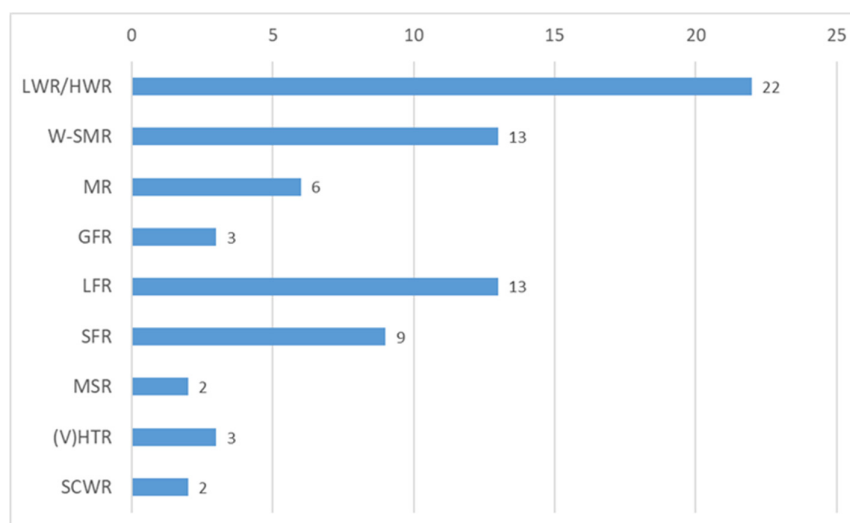
Allegato B Elaborazione dei questionari: aggregazione dei dati

Sono di seguito riportati i risultati del questionario distribuito fra i membri del GdL 2, rappresentati in forma aggregata.

B.1 Generalità

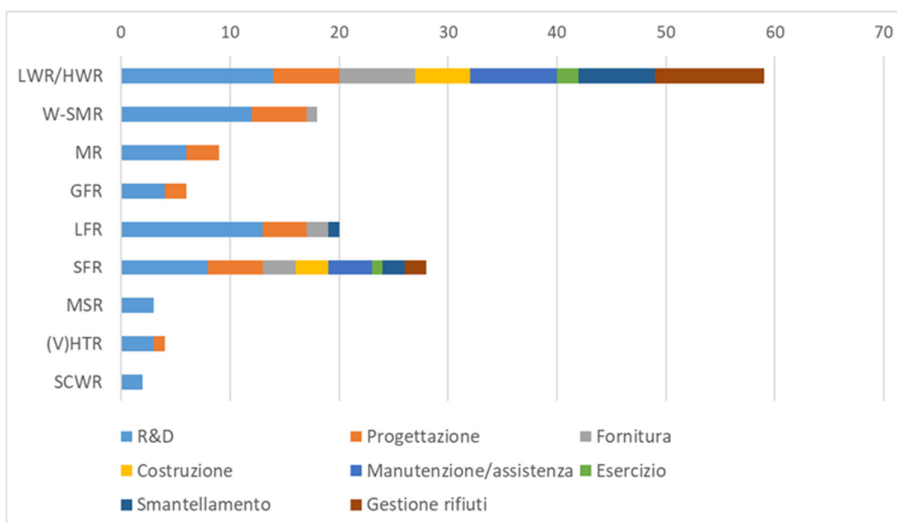
La prima parte del questionario ambiva a fotografare lo stato dell'arte relativamente all'esperienza dei membri del GdL 2 sulle diverse tecnologie contemplate dai lavori della piattaforma: SMR, AMR (suddividendo le 6 tecnologie di IV Generazione) e MR, tanto già acquisita (sezioni B.1.1 e B.1.2), quanto potenzialmente trasferibile (sezione B.1.3). È inoltre inclusa, almeno relativamente all'esperienza pregressa, anche la tecnologia degli attuali reattori commerciali, per completezza.

B.1.1 Tecnologie nucleari sulle quali le organizzazioni vantano esperienza

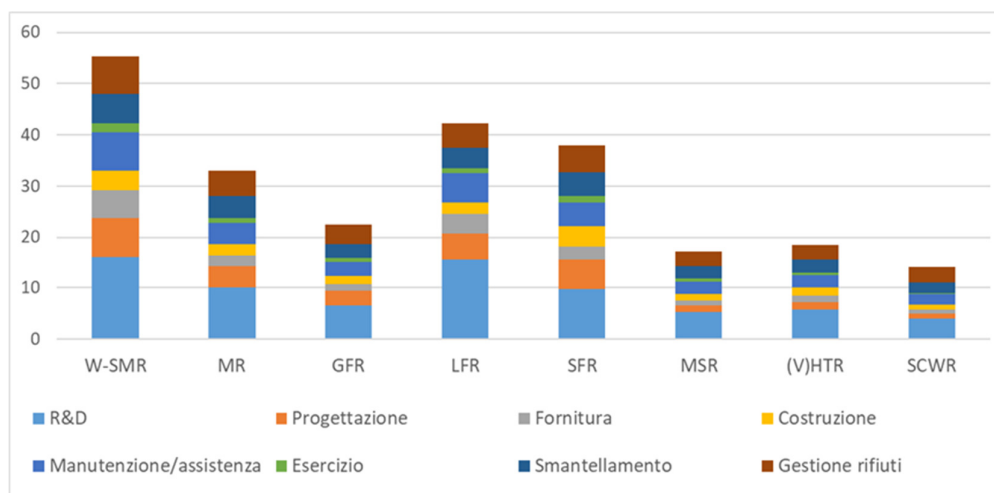


B.1.2 Ruoli con cui le organizzazioni hanno contribuito alle tecnologie di interesse

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE



B.1.3 Trasponibilità dell'esperienza pregressa alle tecnologie nucleari avanzate



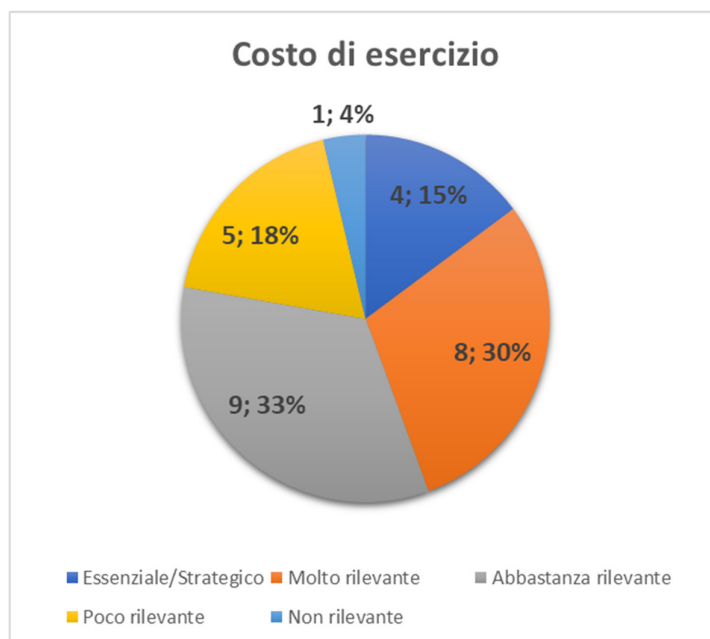
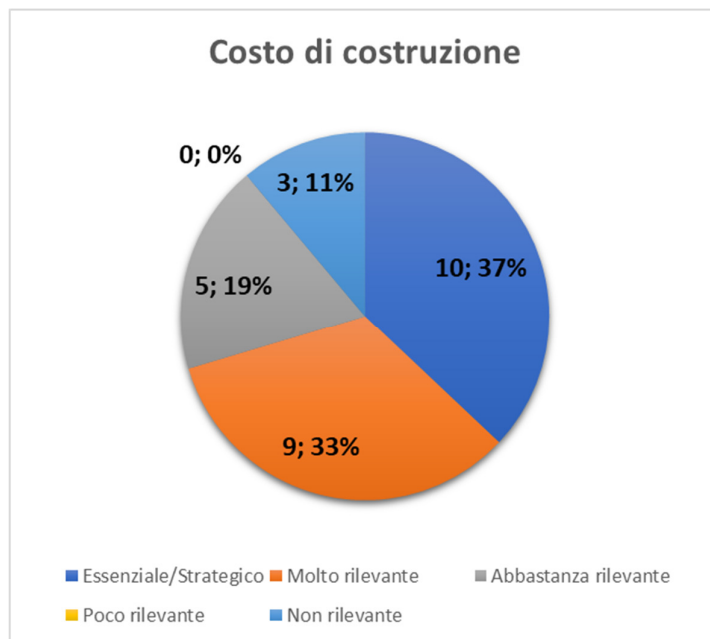
B.2 Approfondimento

Con la seconda parte del questionario, è stata sondata l'opinione dei membri del GdL 2 relativamente agli attributi che dovrebbe avere un possibile futuro impianto nucleare da realizzare in Italia, in particolare per quanto concerne alcuni aspetti principali quali l'economicità, la fattibilità, il grado di innovazione, l'operabilità, le opportunità associate alla realizzazione, il potenziale di sviluppo, la sicurezza e la sostenibilità.

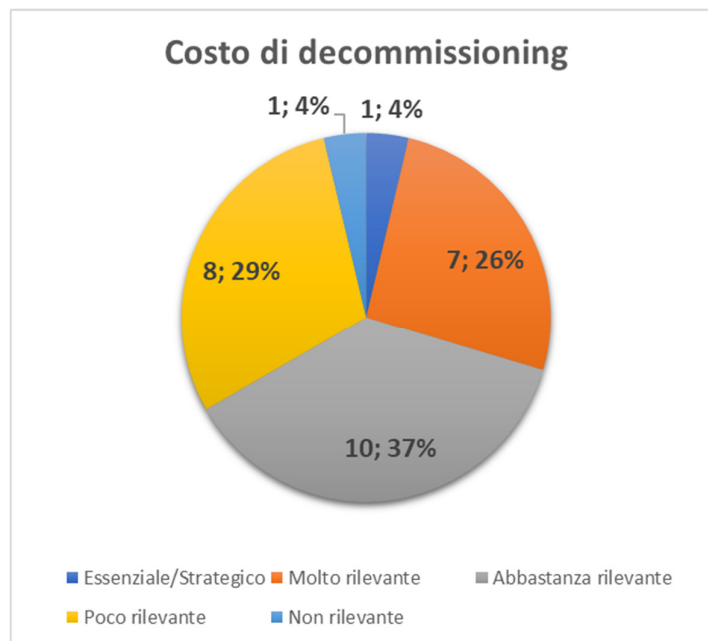
B.2.1 Prioritizzazione degli attributi di un possibile futuro impianto nucleare avanzato in Italia

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

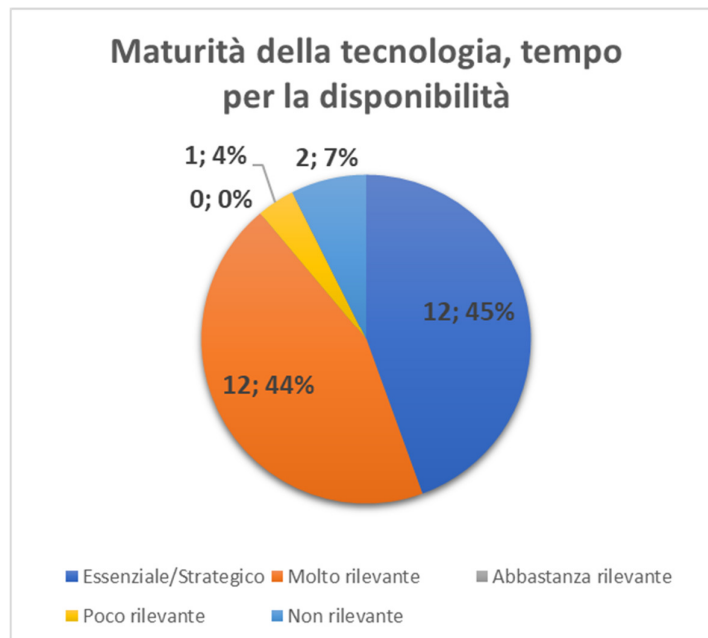
Economicità



PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

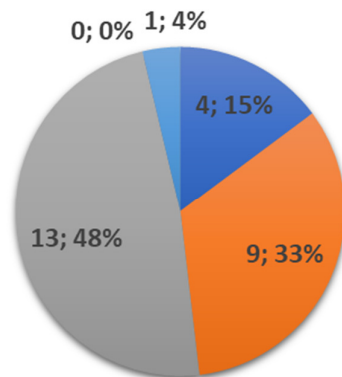


Fattibilità



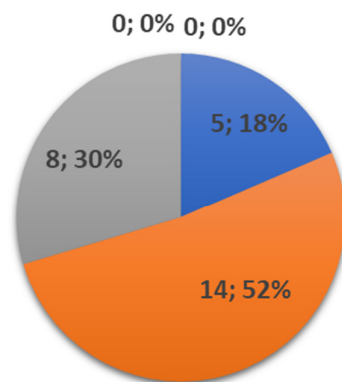
PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Sfruttamento competenze italiane su ricerca residua



■ Essenziale/Strategico ■ Molto rilevante ■ Abbastanza rilevante
■ Poco rilevante ■ Non rilevante

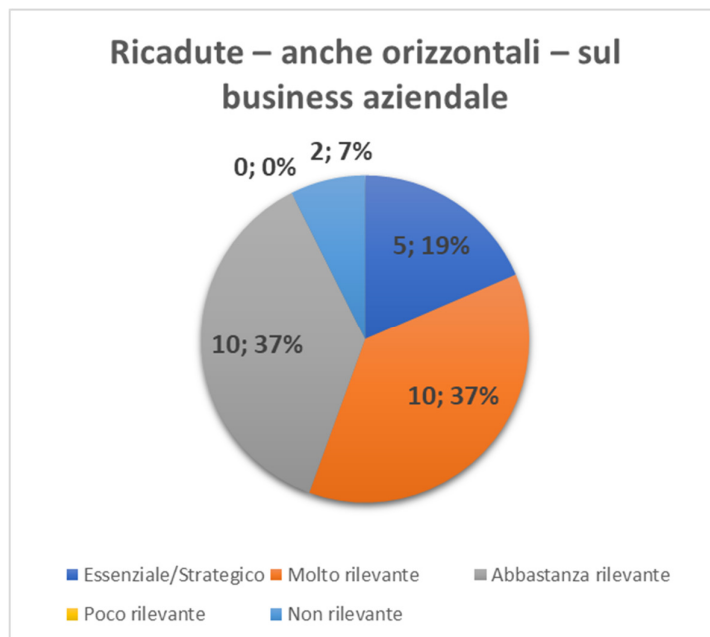
Sfruttamento del know-how italiano per l'approntamento



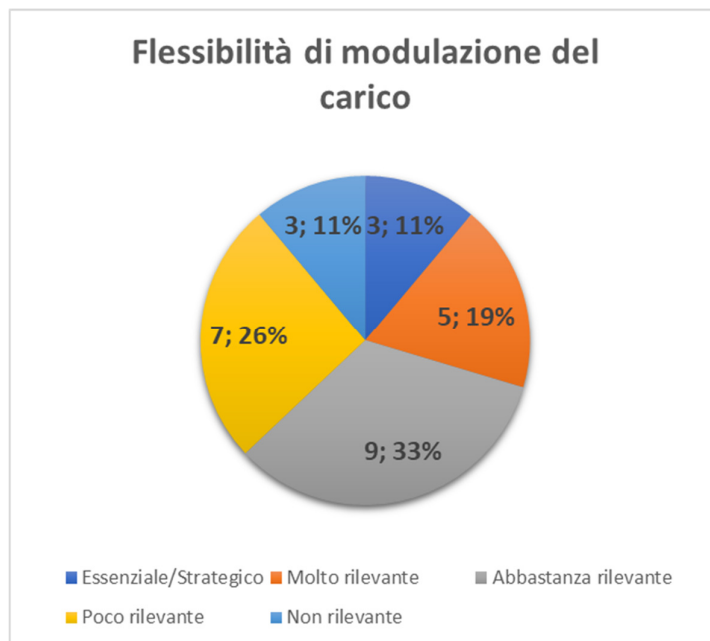
■ Essenziale/Strategico ■ Molto rilevante ■ Abbastanza rilevante
■ Poco rilevante ■ Non rilevante

PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

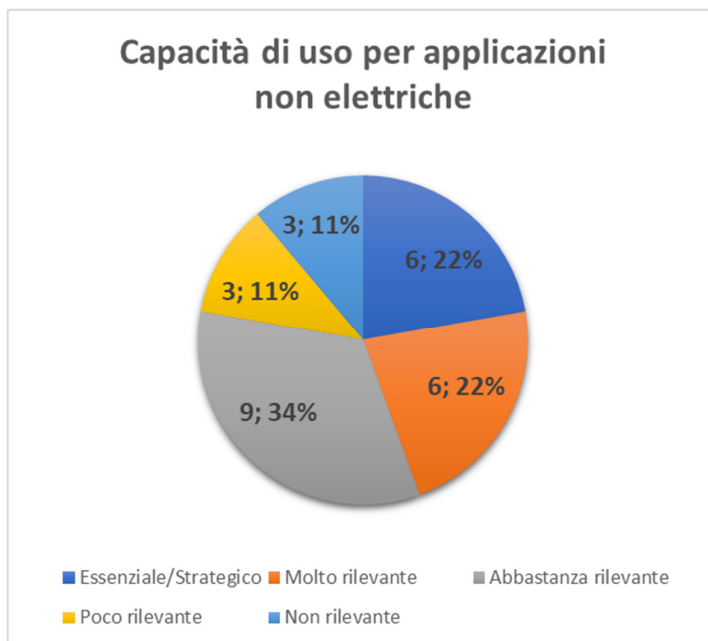
Innovazione



Operabilità



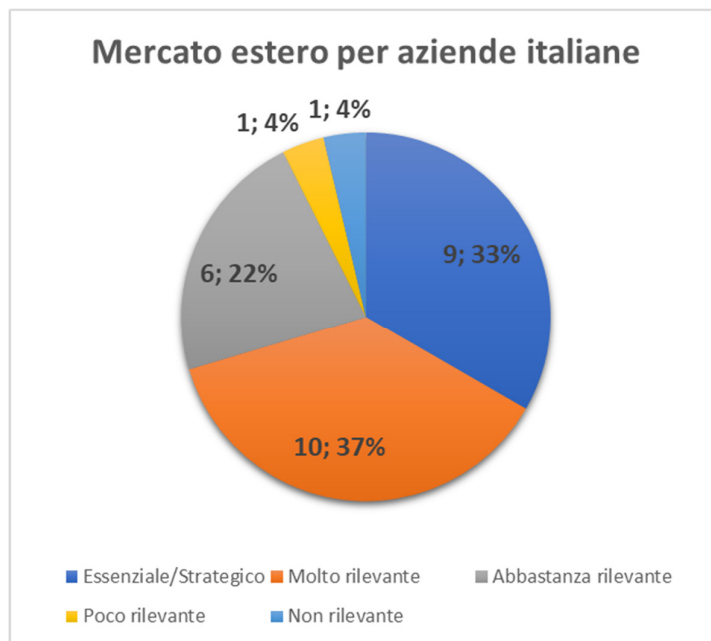
PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE



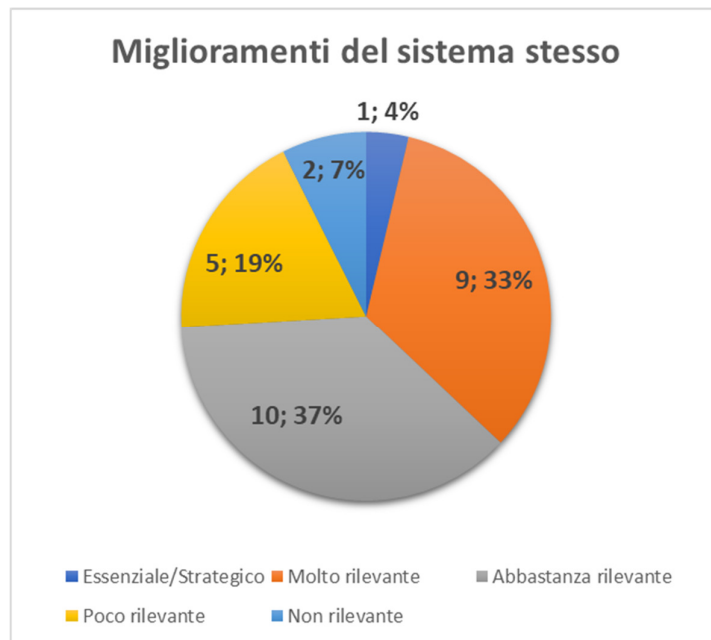
Opportunità



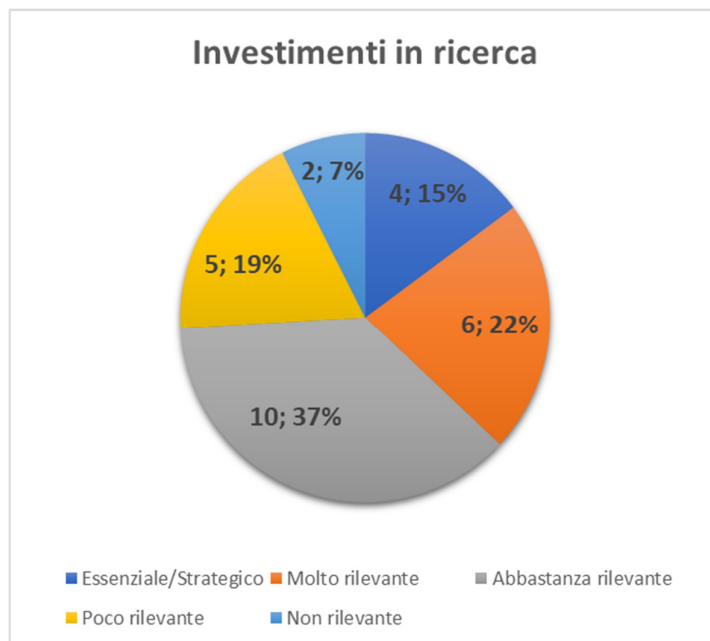
PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE



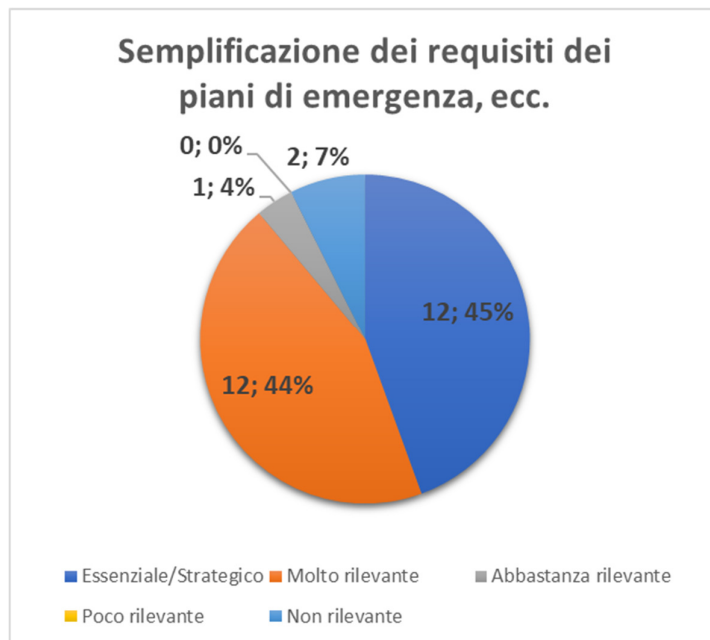
Potenziale di sviluppo



PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE



Sicurezza



PIATTAFORMA NAZIONALE PER UN NUCLEARE SOSTENIBILE

Sostenibilità

