



Confronto tecnico ed economico fra reattori nucleari di grande taglia e SMR

Elaborato finale in Ingegneria dell'Energia

Relatore: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: Giulio Zoppolato

Padova, 21/09/2023



Aspetti
tecnici



Più di 60 anni di storia e letteratura per i reattori nucleari di grande taglia



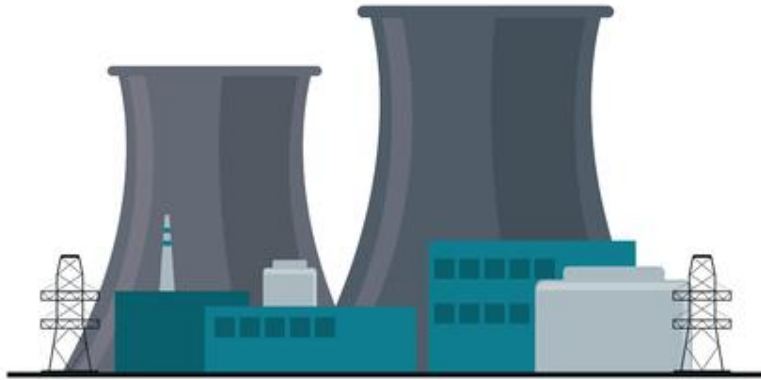
Carenza di esempi realmente modulari per reattori nucleari di piccola taglia



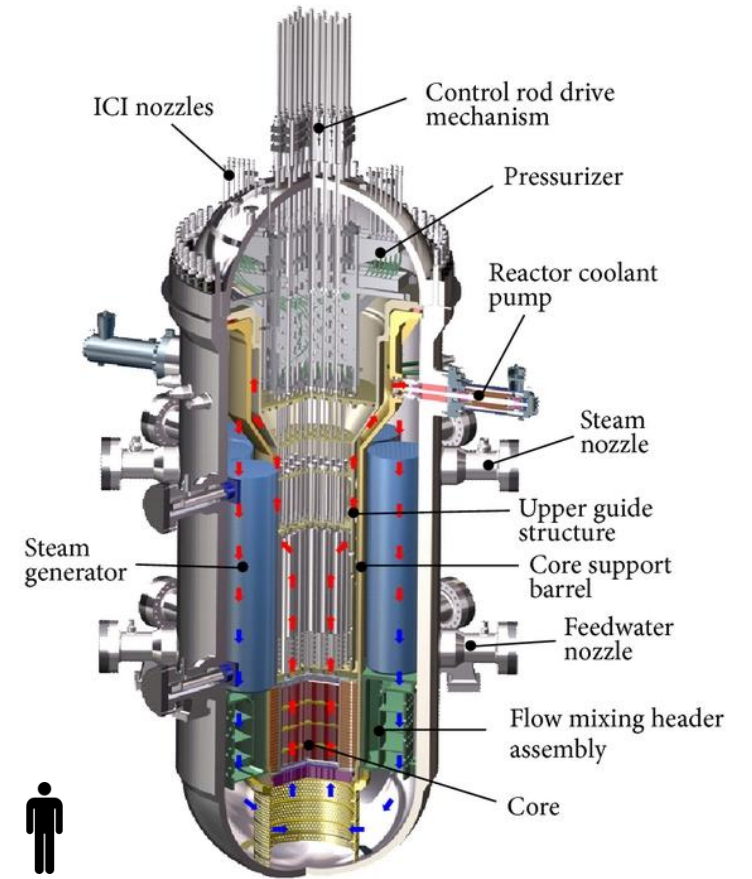
Oltre ad aspetti puramente economici e di LCOE ho considerato anche altri fattori finanziari e fattori legati alla competitività sul mercato



Consapevolezza della sempre maggiore richiesta di energia pulita e dell'importanza nella diversificazione delle risorse energetiche



Taglia



SMART reactor vessel assembly

Alcune peculiarità degli SMR

- Nella costruzione
 - Possibilità di integrazione del circuito primario direttamente nel vessel
 - Approcci innovativi sulla sicurezza
 - Potenziali breeder di combustibile
- Nel sito di installazione
 - Possibilità di installazione sotterranea
 - Agevole integrazione nella rete esistente
 - Minor impatto sul territorio

Principali Tecnologie Utilizzate

LWR

HWR

HTR

MSR

FNR

AHR

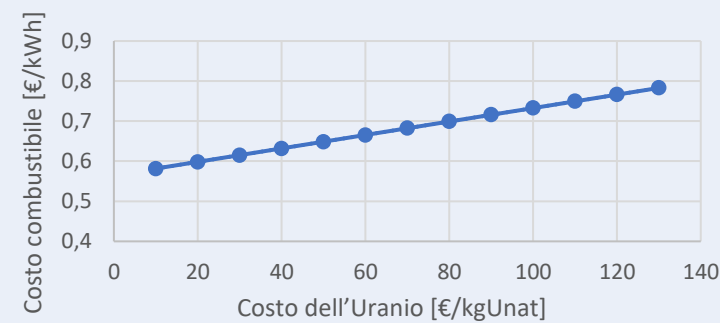
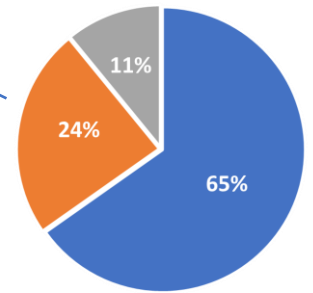
$$c_e = \frac{\sum_{j=-k}^n I_j(1+a)^{-j} + \sum_{j=1}^n M_j(1+a)^{-j} + \sum_{j=1}^n F_j(1+a)^{-j}}{\sum_{j=1}^n E_j(1+a)^{-j}}$$

Esempio di calcolo del LCOE di un LR

Costo impianto	→	4350	[€/kWe]
Anni vita impianto	→	60	[anni]
Capacity factor	→	7500	[h]
Costi fissi di esercizio e manutenzione (incluso dec.)	$4350 \cdot 2,4\%$	104,4	[€/kWe]
Costi variabili di esercizio e manutenzione	→	0,0012	[€/kWh]
Tasso di attualizzazione	→	7%	
Fattore di ammortamento	$z = \frac{a(1+a)^n}{(1+a)^n - 1}$	0,071	
Costo Uranio arricchito (cUA)	$8,41[kgU_{NAT}/kgU_{ARR}] \cdot 75[€/kgU_{NAT}]$	630	[€/KgU _{ARR}]
Costo purificazione e conversione (cPC)	$8,41[kgU_{NAT}/kgU_{ARR}] \cdot 10[€/kgU_{NAT}]$	84	[€/KgU _{ARR}]
Costo arricchimento (cA)	$7,7 SWU \cdot 70€$	540	[€/KgU _{ARR}]
Costo fabbricazione (cF)	$200€ \text{ per } kgU_{ARR}$	200	[€/KgU _{ARR}]
Costo combustibile su kg di Uranio arricchito	$cUA + cPC + cA + cF$	1454	[€/KgU _{ARR}]
Energia elettrica per kg di Uranio arricchito	→	$5 \cdot 10^5$	[kWh/KgU _{ARR}]
Costo combustibile	$\frac{1454}{5 \cdot 10^5}$	0,29	[c€/kWe]
Costo chiusura ciclo del combustibile	→	0,4	[c€/kWe]

Quota investimento iniziale	$\frac{4350 [€/kW]}{7500[h]} * 0,071$	0,041 [€/kWh]
Quota esercizio e manutenzione	$\frac{104,4 [€/kW]}{7500[h]} + 0,001 [€/kWh]$	0,015 [€/kWh]
Quota combustibile	$(0,0029 + 0,004)[€/kWh]$	0,0069 [€/kWh]
Totale	(Somma quote)	0,0629 [€/kWh]

Risultati ottenuti nel calcolo del LCOE



Variatione del costo del combustibile al variare del costo dell'Uranio

Tabelle prese dal “*Projected Costs of Generating Electricity 2020*” della IEA

Paese	Tecnologia	Investimento iniziale (USD/ MWh)			Dismissione (USD/ MWh)			Combustibile (USD/ MWh)	O&M (USD/ MWh)
		3%	7%	10%	3%	7%	10%		
Francia	EPR	21,32	47,46	73,29	0,36	0,05	0,01	9,33	14,26
Giappone	ALWR	21,05	46,87	72,37	0,36	0,05	0,01	13,92	25,84
Corea	ALWR	11,46	25,51	39,39	0,2	0,03	0,01	9,33	18,44
Russia	VVER	12,06	26,86	41,47	0,21	0,03	0,01	4,99	10,15
Slovacchia	altro	36,76	81,84	126,37	1,8	0,96	0,64	9,33	9,72
USA	LWR	22,58	50,26	77,61	0,39	0,05	0,01	9,33	11,6
Cina	LWR	13,28	29,57	45,65	0,22	0,03	0,01	10	26,42
India	LWR	14,76	32,85	50,73	0,25	0,03	0,01	9,33	23,84

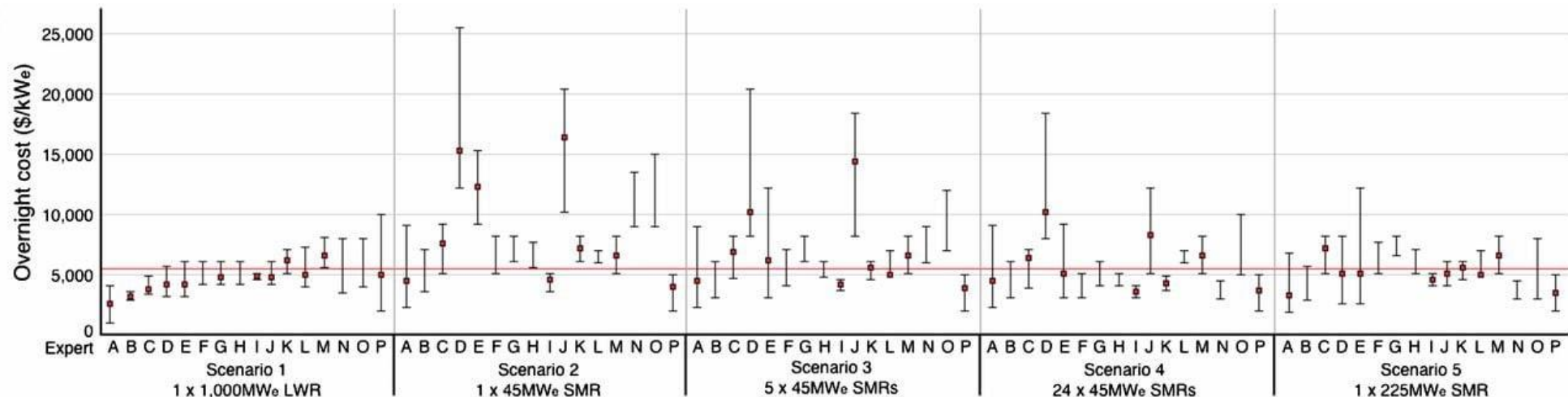
Paese	Tecnologia	Capacità netta (MWe)	LCOE (USD/ MWh)		
			3%	7%	10%
Francia	EPR	1650	45,27	71,1	96,89
Giappone	ALWR	1152	61,16	86,67	112,13
Corea	ALWR	1377	39,42	53,3	67,16
Russia	VVER	1122	27,41	42,02	56,61
Slovacchia	altro	1004	57,61	101,84	146,06
USA	LWR	1100	43,9	71,25	98,56
Cina	LWR	950	49,92	66,01	82,08
India	LWR	950	48,17	66,06	83,91

- La media degli LCOE riportati nelle tabelle, ipotizzato un tasso di sconto pari al 7%, è pari a 69,78 [USD/MWh]
- Equivale a circa 63,5 [€/MWh] il che si avvicina al valore ottenuto in precedenza di 62,9 [€/MWh].

Fonte	Potenza elettrica generata [MW]	Investimento di capitale [\$/kWe]	Fattore di Capacità [%]	Vita dell'impianto anni	LCOE [\$/MWh]
1	150x4 = 600	3000	91	60	47.80
1	150x4 = 600	5000	91	60	62.80
2	50x12 = 600	5100	96,5	60	110
2	50x12 = 600	3800	96,5	60	90
3	180x7 = 1260	3767	90	60	87
3	180x7 = 1260	3767	90	60	85
3	180x7 = 1260	3767	90	60	83
3	180x7 = 1260	3767	90	60	81
4	335x4 = 1340	5086 – 5651	96	60	53 – 56
4	302x2 = 604	4250 – 4720	92	60	47 – 50
4	125x5 = 625	7350 – 8046	90	60	69 – 73
5	335	\	95	60	50
5	335	\	85	40	59

- In tabella sono riportate le stime ottenute da 5 fonti che considerano un SMR con tecnologia LWR
- Si nota una sensibile variazione di dati, comunque paragonabili a quelli ottenuti per gli LR.
- Sotto, indagine condotta coinvolgendo 16 esperti intervistati in merito a cinque diversi scenari relativi agli SMR. Tale indagine evidenzia la necessità di un approccio al «programme-level»

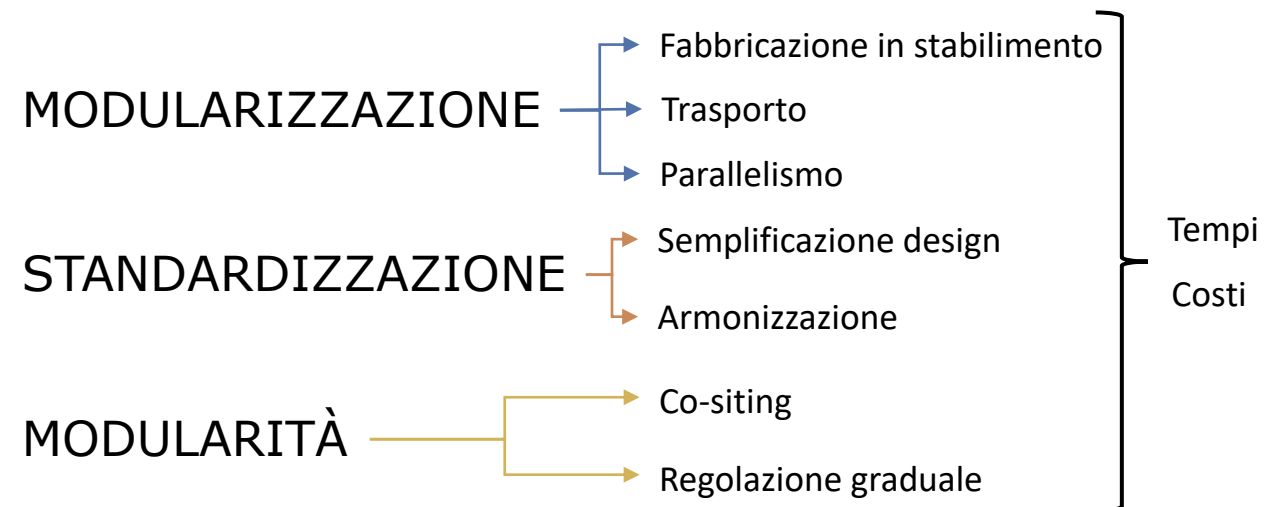
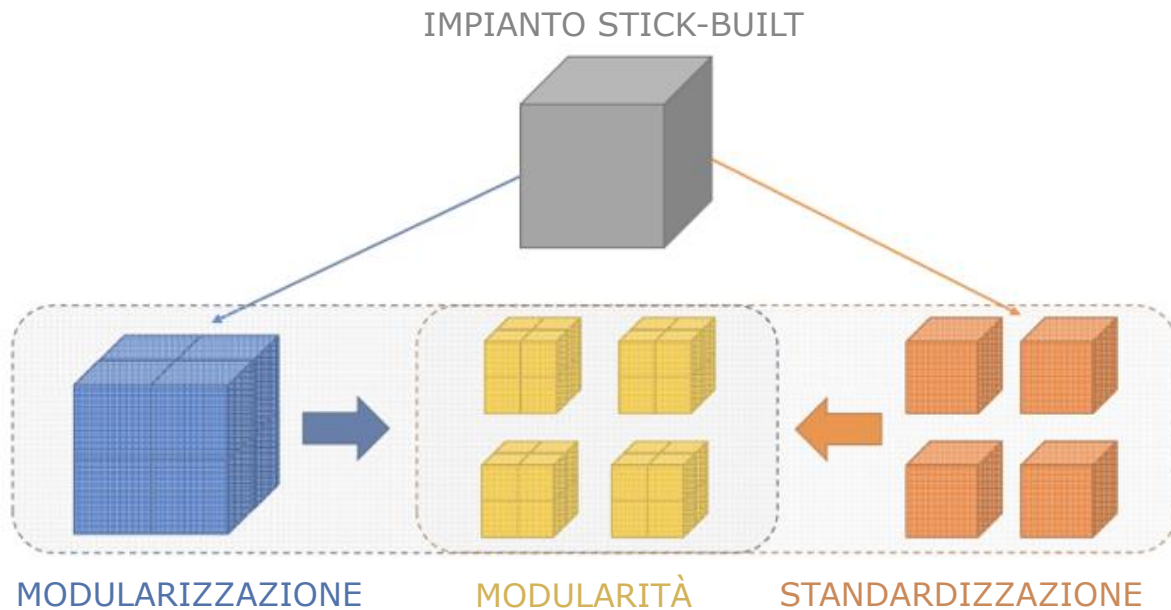
Valutazioni e opinioni fornite da esperti intervistati e riportate nell'articolo "Expert Assessments of the Cost of Light Water Small Modular Reactors" della National Academy of Sciences



ECONOMIA DI SCALA $OCC_{5\ SMR} = OCC_{1\ LR} \cdot \left(\frac{Pot\ 1\ SMR}{Pot\ 1\ LR}\right)^{0,6} \cdot 5 = OCC_{1\ LR} \cdot \left(\frac{200}{1000}\right)^{0,6} \cdot 5 = OCC_{1\ LR} \cdot 1,9$

FATTORE DI APPRENDIMENTO $C_N = C_1 * N^{-L}$

Costo 5 SMR	n° SMR prodotti
13.325.577.571	10
11.993.019.814	20
10.793.717.833	40
9.714.346.049	80
8.742.911.444	160
7.868.620.300	320
7.081.758.270	640
6.373.582.443	1.280



CAPACITY FACTOR
85%

$$CF = \frac{AEO}{MEO}$$

CAPACITY FACTOR
95%



Ciclo combustibile
18 - 24 m

Semplicità progetti

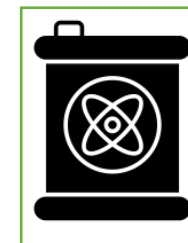
Meno componenti



*Ciclo combustibile
meno frequente*

Ciclo combustibile
36 - 90 m

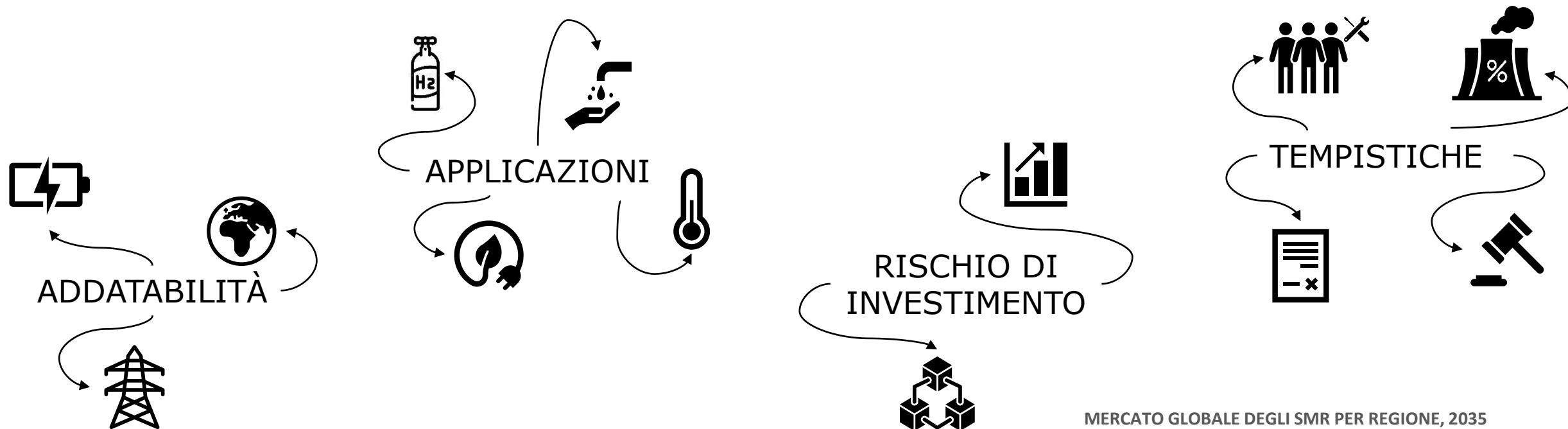
⇒ Risparmio O&M
annuale del 3-5%



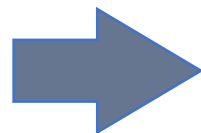
Meno frequente

Più unità operative

One-time fueling SMR



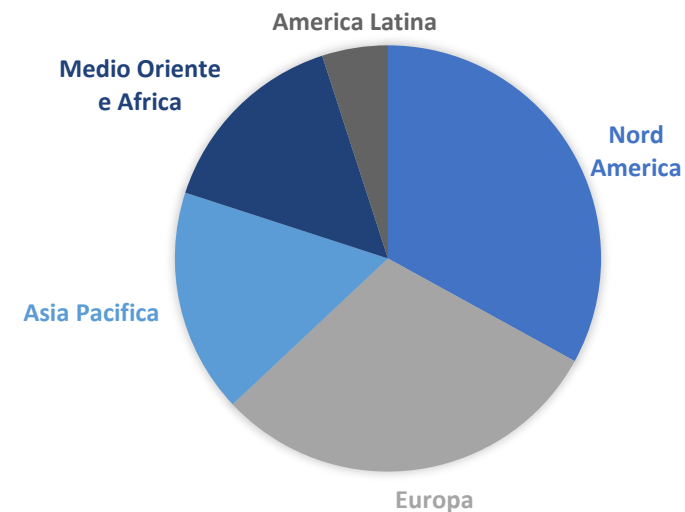
**MERCATO
ATTUALE**
6,66 Mld
70 Progetti
in sviluppo



**PREVISIONE DI
MERCATO 2035**
12,95 Mld

Dati presi dalla pubblicazione OECD «*Nuclear Energy Market Potential for Near-term Deployment*» della NEA

MERCATO GLOBALE DEGLI SMR PER REGIONE, 2035

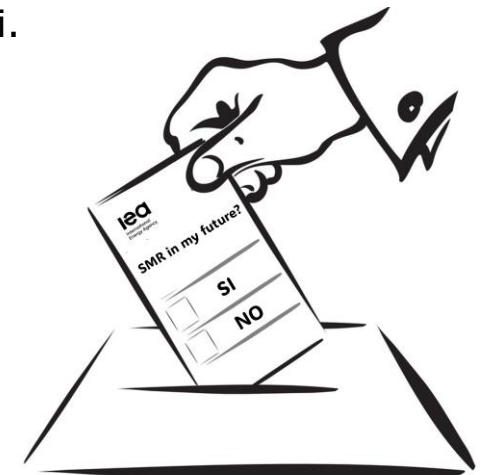


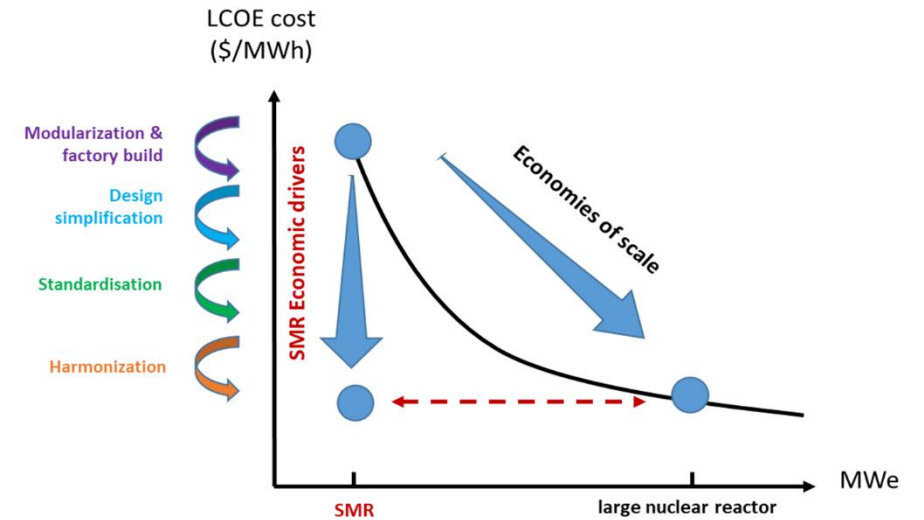
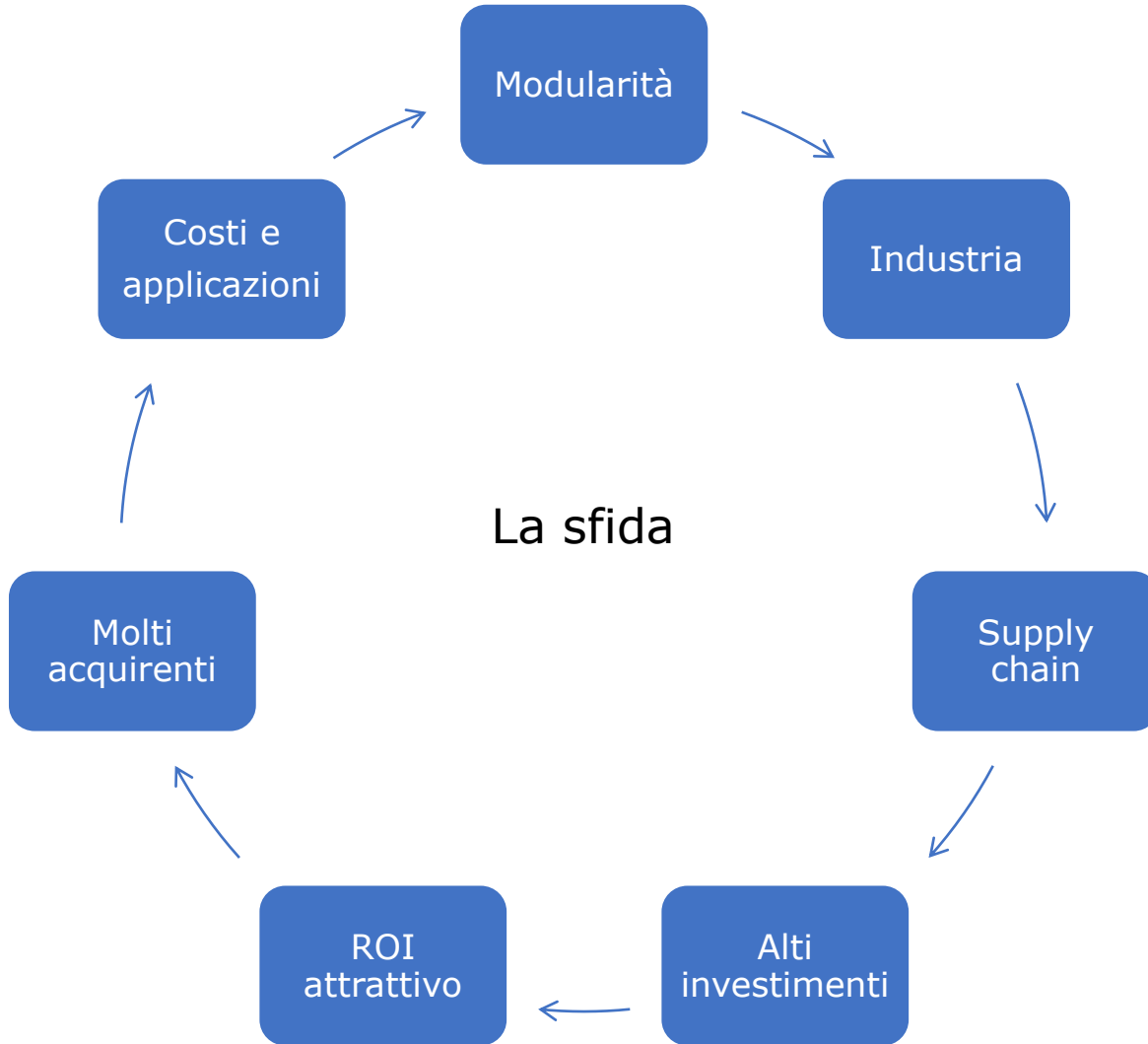
Le diverse tecnologie degli SMR e la loro dimensione compatta offrono una vasta gamma di possibilità di progettazione per migliorare la sicurezza

- Molti SMR sono attualmente in fase di progettazione e prototipazione e possono essere classificati come reattori nucleari di IV generazione, le cui priorità sono:
 - ✓ migliorare la sicurezza attraverso approcci passivi e installazione sotterranea;
 - ✓ ridurre la produzione di rifiuti radioattivi;
 - ✓ combattere la proliferazione nucleare a scopi militari;
 - ✓ minimizzare gli sprechi;
 - ✓ ridurre i costi di costruzione e di gestione
- Sono più compatibili con la rete elettrica esistente e non necessitano di nuove linee elettriche dedicate.
- La condizione di FOAK comporta certamente sfide importanti, ma beneficia della mancanza di incidenti pregressi, rendendola potenzialmente più accettabile per il pubblico.

Primi nel loro genere comportano alcune sfide sociali:

- La quantità di reattori gestiti da una singola sala di controllo non è ancora stata concordata e regolamentata. I produttori spingono per numeri elevati a spese della sicurezza.
- L'Emergency Planning Zone deve ancora essere definita e i produttori di SMR spingono per una riduzione da 10 miglia a meno di 1 miglio.
- Incidenti catastrofici imprevisti in un reattore potrebbero compromettere l'intervento su altri reattori e innescare incidenti a catena.
- Gli SMR, se non gestiti attentamente, potrebbero aprire la porta a un nucleare a basso costo, con il rischio di favorire la proliferazione delle armi nucleari.





- Comunque già utilizzati ancora prima di essere modulari ed economici
- Si integrano particolarmente bene con le diverse realtà e fonti energetiche a cui si punta in questi anni
- Maggior flessibilità e applicazioni
- È necessario che poche tecnologie principali guadagnino il sopravvento sulle altre
- Approccio al «programme level»
- In un futuro scenario con la fusione nucleare la flessibilità di impiego rappresenterà sempre un valore

