

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale
**«COSTI DI IMPIANTO DELLE CENTRALI
NUCLEARI ATTUALMENTE IN COSTRUZIONE»**

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: *Gazzola Eddy*

Padova, 22/09/2022

La metrica economica di base per qualsiasi impianto di generazione dell'energia elettrica è il costo livellato dell'elettricità (LCOE), esso tiene conto dei seguenti costi:

- Costi di impianto;
- Costi di esercizio e manutenzione;
- Costi del ciclo del combustibile;

Per le centrali nucleari, la componente dei costi che incide di più all'interno dell'LCOE sono i costi di impianto.

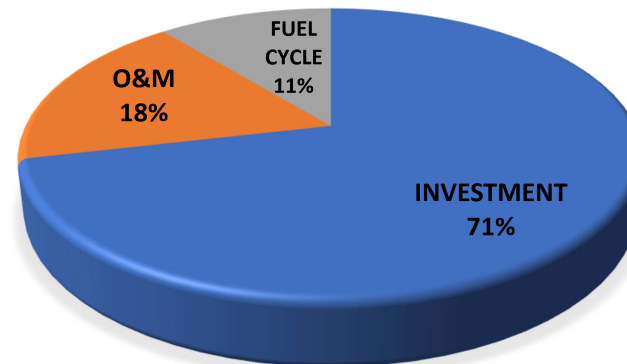


Diagramma ottenuto dai dati ricavati dal calcolatore del costo livellato dell'energia elettrica (LCOE) della Nuclear Energy Agency (NEA).

Obiettivi, in questo elaborato verranno analizzati i seguenti punti:

- 1) Definizione e scomposizione nelle principali componenti dei costi di impianto delle centrali nucleari;
- 2) Stima dei costi di impianto delle centrali nucleari attualmente in costruzione nel mondo;

Metodologia, i costi delle centrali nucleari riportate in seguito saranno convertite in un'unica valuta di riferimento, valutata nell'anno corrente ($\$_{2022}$), in modo da considerare anche gli effetti dell'inflazione e poter eseguire un confronto tra i costi dei vari paesi considerati.



Per le stime dei costi degli impianti nucleari si sono utilizzati i Costi di Costruzione Overnight, poiché questa metrica consente di cogliere il costo intrinseco delle varie tecnologie di reattori e di notare meglio le differenze dei costi tra i paesi confrontati.

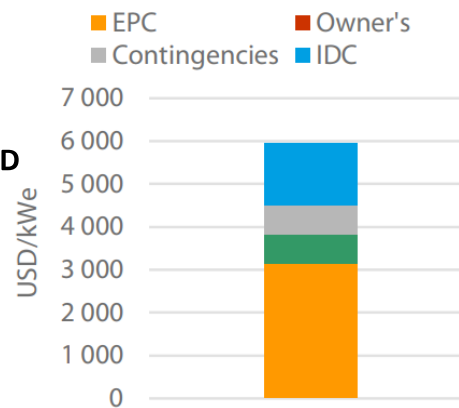
Definizione: I **costi di impianto** di una centrale nucleare comprendono tutti gli elementi necessari per la sua progettazione, costruzione e messa in servizio.

Questo comprende le spese per i materiali, i componenti e apparecchiature e la loro installazione, nonché i salari del personale ed il costo del capitale coinvolto.

Componenti:



Scomposizione costi di impianto di una centrale nucleare nei paesi OECD

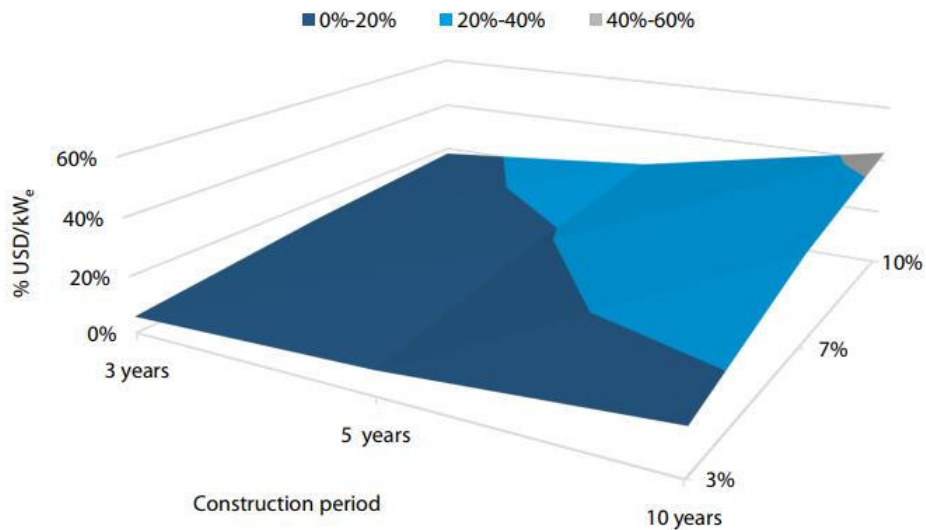


Interessi durante la costruzione (IDC): Per ogni progetto infrastrutturale e anche per le centrali nucleari, oltre all'effettivo capitale speso, c'è un costo da pagare relativo alla messa a disposizione di tale capitale, cioè gli interessi durante la costruzione, o «costo di finanziamento». I prestiti raccolti per coprire i costi di investimento devono essere rimborsati ai prestatori e, allo stesso modo, gli investitori richiederanno un certo tasso di rendimento.

$$IDC = OCC \cdot \sum_{K=1}^{CT} W_k \cdot (1 + r)^{CT-(k-1)} - 1$$

Dove:

- OCC= Overnight Construction Cost
- CT= Tempo di costruzione
- W_k = Frazione del capitale totale speso all'anno «k»
- r= Tasso di sconto

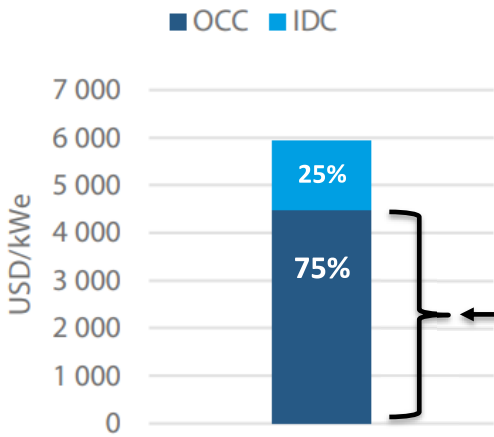


Cost of capital →

Percentuale degli IDC nei costi di impianto per kW_e, in funzione dei costi del capitale e del tempo di costruzione.

Costo di costruzione overnight (OCC): Comprende tutti i costi di costruzione di un bene indipendentemente dal tempo necessario alla sua progettazione e costruzione. Questa metrica presuppone che tutte le spese siano sostenute "durante la notte" (Overnight), trascurando l'effetto del tempo in termini di interessi finanziari. In altre parole, è il costo intrinseco di una tecnologia senza l'impatto di condizioni finanziarie che sono, tipicamente, dipendenti dal paese e dal progetto considerato. Questa categoria di costo è generalmente normalizzata in base alla potenza elettrica dell'impianto (e.g. \$/kWe).

Scomposizione costi di impianto di una centrale nucleare nei paesi OECD (costo del capitale pari al 7% e un tempo di costruzione di 7 anni)



L'OCC può essere suddiviso ulteriormente in diverse «sottocategorie»; Non esiste un modo generico di suddividere questo costo, tuttavia è possibile individuare tre categorie principali:

Costi del proprietario (OC): L'entità dei costi sostenuti dal proprietario varia in base alle sue capacità ed ai costi al di fuori dei contratti «EPC». Esistono varie definizioni, in quella riportata dall'AIEA, compaiono i seguenti costi:

- Servizi di amministrazione generale, project management, consulenza legale e finanziaria;
- Selezione del sito e concessione delle licenze;
- Infrastrutture di supporto del sito (e.g. interconnessioni elettriche, approvvigionamento idrico e strade);
- Licenze ed autorizzazioni;
- Tasse e spese legali;
- Costi pre-operativi;

15-20% dell'OCC

Costi per imprevisti durante la costruzione (Contingency): Le contingenze sono «voci» incluse nelle stime dei costi, per tener conto di tutti i costi omessi, o per gli imprevisti a causa dell'incompletezza del progetto. Inoltre, tra le contingenze possono essere inclusi anche i costi di riparazione, rimontaggio e reinstallazione. Si possono considerare le seguenti stime per le differenti categorie di centrali nucleari:

FOAK₁ 30-50%
FOAK₂ 15-30%
NOAK₂ 10-15%

Costi di ingegneria, approvvigionamento e costruzione (EPCC): Questa categoria di costi comprende tutte le attività relative alla progettazione, agli appalti e dalla costruzione fino alla messa in servizio e consegna al gestore dell'impianto.

In questa categoria di costi rientrano elementi come:

- Materiali e componenti;
- Attrezzatura ed opere civili;
- Manodopera per l'installazione;
- L'ingegnerizzazione, gestione e supervisione del progetto;

50-70% dell'OCC

Ad oggi, il numero di reattori nucleari in costruzione nel mondo si attesta a **57 unità** (49 di questi sono reattori di tipo PWR di generazione III/III+), che sono prevalentemente distribuiti in Asia e nell'Europa centro-orientale.

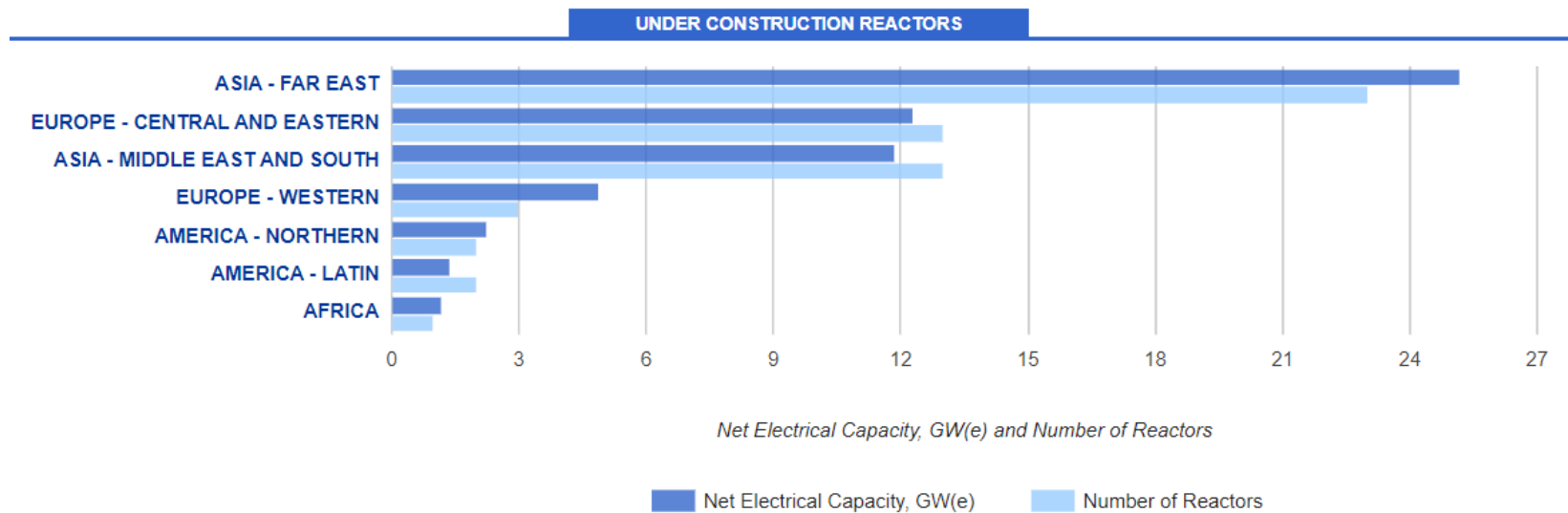


Diagramma tratto dal sistema PRIS dell'AIEA, in cui vengono riportati il numero di reattori nucleari in costruzione nel mondo e la potenza elettrica netta, suddivisi in base alle regioni storicogeografiche.

Ad oggi, in **Europa** sono in costruzione **9 reattori nucleari**, in cinque paesi, per una potenza elettrica lorda complessiva di circa **10,7 GWe**.

PAESE	NPP	MWe lordi	OCC[bln\$2022]	TIC[bln\$2022]	OCC [\$2022/kWe]	TIC[\$2022/kWe]	DATA INIZIO COSTRUZIONE
Inghilterra							
	Hinkley Point-C1&C2	3400	31,9		9382		2018
			33,4		9824		
Francia							
	Flamanville 3	1650	14,9	22,4	9030	13576	2007
Bielorussia							
	Belarusian-1&2	2400	7		2917		2014
Slovacchia							
	Mochovce-3&4	940		6,3		6702	1987
Ucraina							
	Khmelnytskyi-3&4	2300	10		4348		1986

Come riportato nella tabella soprastante, i costi di costruzione overnight delle centrali nucleari in Europa, variano dai 2917 \$₂₀₂₂/kWe delle due unità in costruzione presso il sito nucleare in Bielorussia, ai 9824 \$₂₀₂₂/kWe delle due unità di Hinkley Point C in Inghilterra.

Negli Stati Uniti, attualmente sono in costruzione due unità di reattori AP1000 (PWR) da circa 1250 MWe, **Vogtel 3&4**, con un costo di costruzione iniziale stimato di circa 14 miliardi di dollari.



Foto del sito di costruzione delle due unità Vogtel 3&4, 2020.

Dalle stime più recenti riportate da uno studio dell'MIT, sono emersi i seguenti costi:

Costo di costruzione overnight (OCC):

$\$_{2018}$ 21,4 miliardi \longrightarrow 10120 $\$_{2022}/\text{kWe}$

Costo di investimento totale (TIC):

$\$_{2018}$ 27,84 miliardi \longrightarrow 13160 $\$_{2022}/\text{kWe}$

Attualmente in **Asia** sono in costruzione ben **34 reattori nucleari**, per una potenza elettrica lorda complessiva di circa **38,7 GWe**.

PAESE	NPP	MWe lordi	OCC[bln\$2022]	TIC[bln\$2022]	OCC [\$2022/kWe]	TIC[\$2022/kWe]	DATA INIZIO COSTRUZIONE
Cina							
	Sanaocun-1&2	2420			2800		2020
	Changjiang-3&4	2400					2021
	Fangchenggang-3&4	2360					2015
	Taipingling-1&2	2400			3500		2019
	Zhangzhou-1&2	2424					2019
	Tainwan-7&8	5000	3,16			632	2021
	Xudabao-3&4			2021			
	Sanmen-3	1251			2968		2022
	Haiyang-3	1251			2968		2022
	Shidaowan-1&2	3000	8,13		2710		2019
	Xiapu-1	600			4500		2017
	Linglong-1	125					2021
India							
	Kakrapar-4	700	1,21		1729		2010
	Kudankulam-3&4	2000		6,25		3125	2017
	Kudankulam-5&6	2000		7,08		3540	2018
	Rajasthan-7&8	1400		2,14		1529	2011
Giappone							
	Ohma	1400			2950-3540		2010
	Shimane	1400					2006
Korea del sud							
	Shin Hanul-2	1400			2070		2013
	Shin Kori-5&6	2800	7,6		2714		2017
Bangladesh							
	Rooppur-1&2	2400	15,56		6483		2017

In Russia sono attualmente in costruzione , tre reattori nucleari in due siti, per una capacità complessiva di circa 2,9 GWe.

- **Kursk 2-1&2:**



Nel sito verranno implementate le prime due unità del modello di reattore di generazione III+, VVER-TOI (PWR), sviluppato a partire dal modello VVER-1200.

La stima del **costo di costruzione overnight** è di: 1400 \$₂₀₂₂/kWe

Installazione del contenitore a pressione in Kursk 2-1

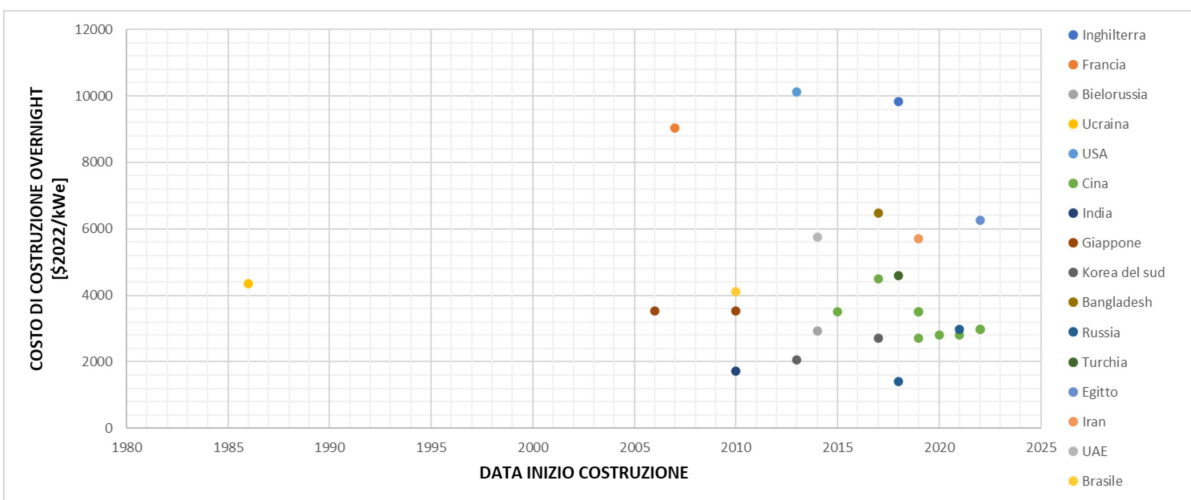
- **Seversk:** In questo sito nucleare, nel 2018 è iniziata la costruzione del reattore nucleare di IV generazione, BREST-300-OD. Si tratta di un reattore a neutroni veloci raffreddato al piombo, caratterizzato inoltre da un ciclo del combustibile chiuso.

La stima del **costo di costruzione overnight** è di: 2969 \$₂₀₂₂/kWe

I rimanenti **9 reattori nucleari** in costruzione, per una potenza elettrica lorda di circa **11 GWe**, sono prevalentemente distribuiti nelle zone del **Medio Oriente**.

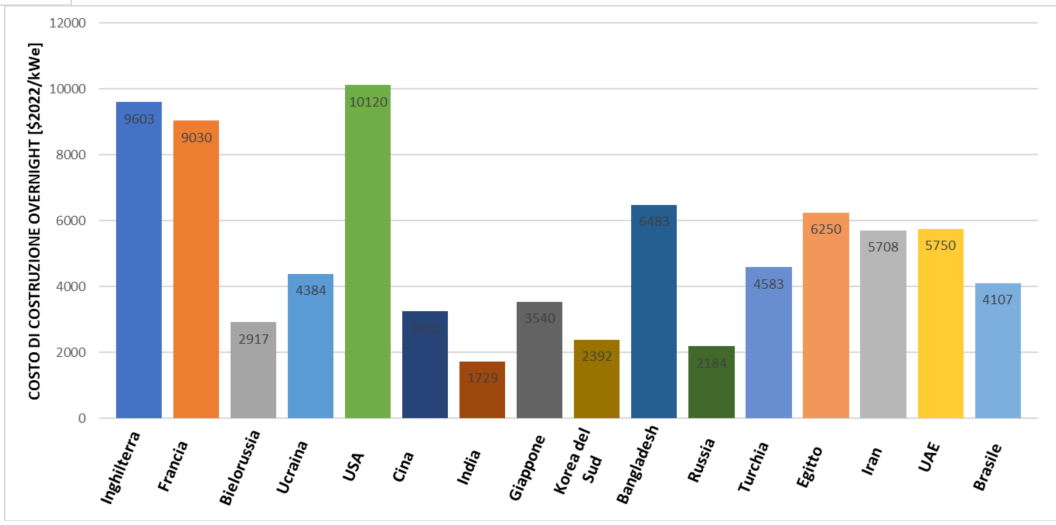
PAESE	NPP	MWe lordi	OCC[bln\$2022]	TIC[bln\$2022]	OCC [\$2022/kWe]	TIC[\$2022/kWe]	DATA INIZIO COSTRUZIONE
Turchia							
	Akkuyu-1-4	4800	22		4583		2018
Egitto							
	El Dabaa-1	1200	7,5		6250		2022
Iran							
	Bushehr-2	1060	6,05		5708		2019
UAE							
	Barakah-3&4	2800			5750		2014
Brasile							
	Angra-3	1400	5,75		4107		2010

Turchia, Egitto ed Iran per la costruzione dei loro reattori nucleari stanno sfruttando la collaborazione con la **Russia**, che oltre a fornire gran parte del capitale necessario alla costruzione degli impianti, sta fornendo anche la tecnologia e le competenze necessarie.



Il grafico rappresenta i costi di costruzione overnight, normalizzati in base alla potenza elettrica lorda, degli impianti nucleari in costruzione nel mondo, in funzione della data di inizio costruzione (di norma assunta come la data della prima colata di calcestruzzo nucleare).

Il diagramma rappresentato sulla destra, riporta la media dei costi di costruzione overnight degli impianti nucleari in costruzione, per ogni paese ad eccezione delle Slovacchia.



Dai precedenti diagrammi è possibile suddividere in tre «fasce» diverse i paesi, in base ai loro costi di costruzione overnight:

1° Fascia → costo OCC che varia tra i circa **9000** ai **10100** \$₂₀₂₂/kWe

2° Fascia → costo OCC che varia tra i circa **4000** ai **6500** \$₂₀₂₂/kWe

3° Fascia → costo OCC che varia tra i circa **1700** ai **3500** \$₂₀₂₂/kWe

Le principali cause per cui si trovano differenze tali tra i paesi all'interno della prima e terza fascia possono essere:

- **Minor costo del lavoro** ed una contemporanea **maggior produttività** del settore delle costruzioni;
- Mantenimento della «**competenza nucleare**»;
- Standardizzazione e «costruzione in serie» dei reattori, ed esportazione della tecnologia nucleare;
- Miglioramento degli aspetti di approvvigionamento dei materiali, dell'organizzazione e delle tecniche di costruzione;

Mentre, nel caso dei paesi della seconda fascia, sebbene stiano costruendo i loro primi reattori nucleari (FOAK₂), riescono a mantenere dei costi OCC ben al disotto dei paesi che rientrano nella prima fascia e che hanno molta più esperienza nel campo dell'energia nucleare (come USA, Francia ed Inghilterra) grazie appunto alle collaborazioni istituite con paesi come la Cina e soprattutto la Russia.