

Energetica Nucleare

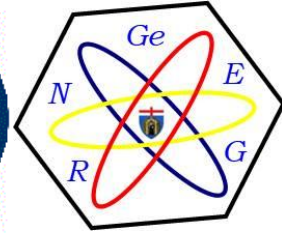
Costi dell'Energia Nucleare



Prof. Ing. Guglielmo Lomonaco

email: guglielmo.lomonaco@unige.it

Tel: +39-010-3352867

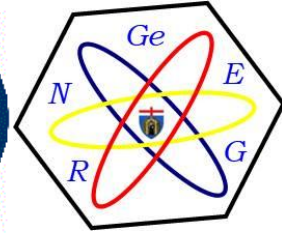


Costi Produzione Elettrica per via Nucleare

Costo sociale (o totale) = Costo privato (o interno) + Costo esterno

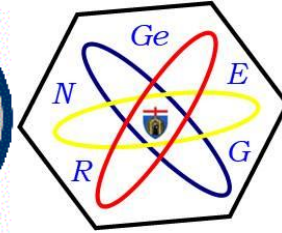
Prendendo quindi in considerazione i costi privati, gli elementi di costo sono:

1. Costi di investimento $\sim 60\div 85\%$
2. Costi di smantellamento $< 5\%$
3. Costi di funzionamento e manutenzione (O&M) $\sim 10\div 25\%$
4. Costi del ciclo di combustibile (Fuel cycle) $\sim 5\div 15\%$



FOAK vs. NOAK

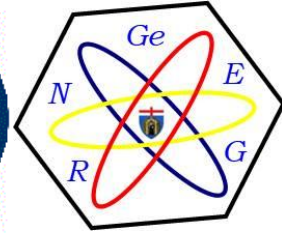
- Risulta importante durante la trattazione distinguere gli impianti in base all'esperienza maturata sui diversi tipi di centrale
- Infatti, il progetto di una nuova tipologia di impianto presenta un costo più elevato rispetto ad un NPP della quale si abbia già avuto esperienza (es: LWR classici)
- Si potrà distinguere in:
 - FOAK (First of a kind)
 - FOAK₂
 - NOAK (n_{th} of a kind)



NPP - Costi di investimento

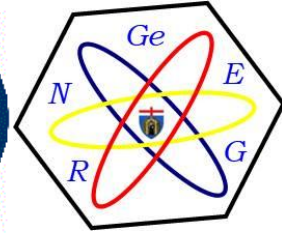
I costi di investimento vengono suddivisi in:

- Costi di costruzione overnight (OCC)
 - Costo del Proprietario (OC)
 - Engineering, Procurement & Construction cost (EPCC)
 - Contingency cost
- Costo del finanziamento (IDC)
(legato agli interessi da pagare durante la costruzione)



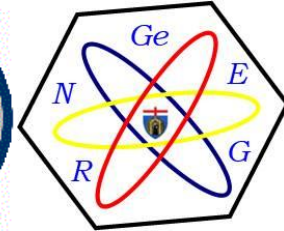
NPP - Costi di costruzione overnight [1/2]

- Con costo “overnight” si intende il costo di costruzione puro, cioè privato di tutte quelle componenti legate ai tassi di interesse, come se la costruzione avvenisse nell’arco di una sola notte
- Il costo overnight quindi dipende dalla potenza installata e non dall’energia prodotta, e andando a vedere la situazione mondiale si vede che i valori variano moltissimo tra Oriente (~2000 \$/kW in Russia, Cina e Corea) ed Occidente (~4000 \$/kW o addirittura ~6000 \$/kW)



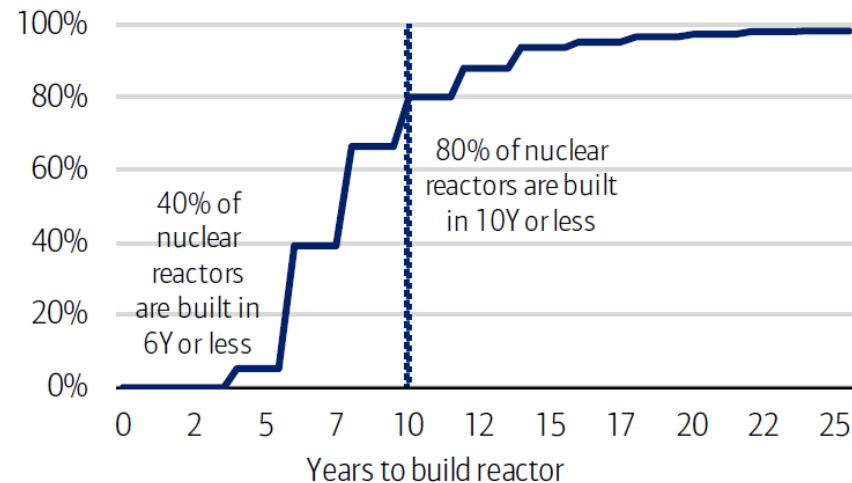
NPP - Costi di costruzione overnight [2/2]

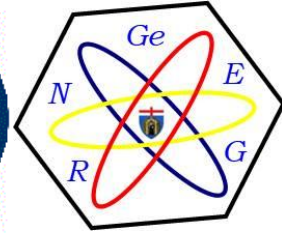
- Costo OC: comprende studi di fattibilità, spese legali, costo della manodopera, owner's engineering
- Costo EPCC: comprende le attrezzature ed i macchinari di processo, la forza lavoro sia diretta sia indiretta, le strutture sul luogo e le infrastrutture che supportano l'impianto
- Contingency cost: somma di sicurezza prestabilita ed accantonata per qualsiasi eventualità



NPP - Costo del finanziamento (IDC) [1/2]

- Gli impianti nucleari hanno dei tempi di costruzione che partono da 4÷5 anni, ma che in alcuni casi sono arrivati addirittura a 17 anni (la media mondiale è ~6÷8 anni)
- Chi investe nella costruzione impiega parecchio a rientrare dei soldi spesi e questo viene compensato con dei tassi di interesse generalmente abbastanza alti
- Questo può essere in parte evitato con interventi pubblici, ad esempio con prestiti pubblici a tasso di inflazione o con garanzie sul prezzo di acquisto futuro dell'energia prodotta dall'impianto



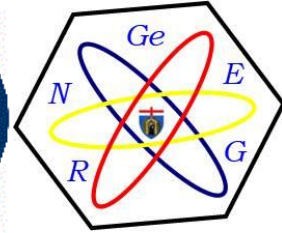


NPP - Costo del finanziamento (IDC) [2/2]

$$IDC = OCC \cdot (IDC)_{\text{fract}}$$

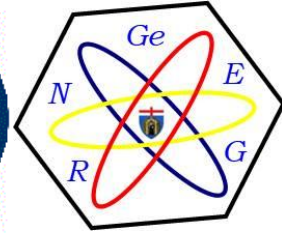
$$\text{dove: } (IDC)_{\text{fract}} = \sum_{k=1}^{CT} W_k (1 + r)^{CT - (k-1)} - 1$$

- OCC = costo di costruzione overnight
- $(IDC)_{\text{fract}}$ = la frazione aggiuntiva dell'OCC dovuta all'interesse durante la costruzione;
- CT = tempo di costruzione
- W_k = la frazione del capitale totale speso nell'anno k
- r = tasso di sconto (chiamato talvolta anche tasso di interesse)



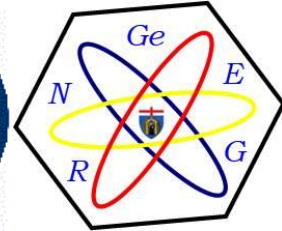
NPP - Costi di smantellamento

- Storicamente i costi del decommissioning sono da sempre stati inglobati nel costo del kWh nucleare (e questo, almeno fino a non molti anni fa, non era vero per altre fonti energetiche)
- In genere i costi di smantellamento rappresentano una quota molto bassa sulla totalità dei costi e vengono spesso integrati all'interno dei costi di investimento (insieme ad una parte delle esternalità)
- L'operatività molto lunga di una centrale nucleare (>40 anni per quelle di II generazione, >60 anni per quelle di III) fa sì che i fondi per il decommissioning possano essere accantonati con molta calma a piccole dosi ($\sim 1 \div 2$ % del costo del kWh) ed investiti in fondi a basso rischio (in modo da accumulare interessi per un periodo di tempo molto lungo)

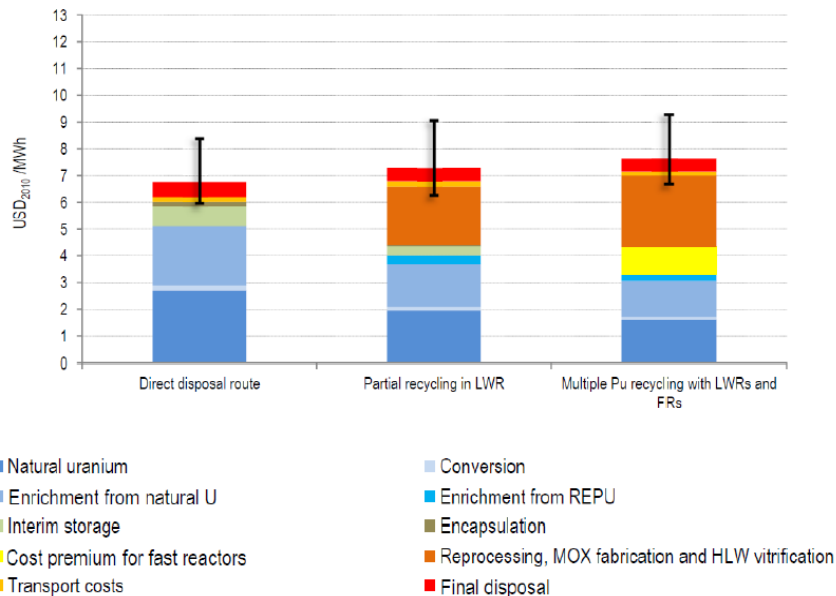


NPP - Costi di O&M

- I costi O&M comprendono:
 - I costi del personale operativo e di supporto
 - La sicurezza
 - La gestione dello smaltimento dei rifiuti operativi
 - I costi di manutenzione periodica e di ispezione
- I costi O&M sono suddivisibili in:
 - parte fissa [€/a per MW]
 - parte variabile con il volume di produzione [€/MWh]



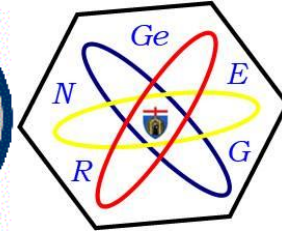
NPP - Costi del fuel cycle



Sensibilità del costo del fuel cycle in tre differenti casi di gestione del back-end (tasso di sconto 3%, 75 TWh/anno)

Voce	PWR-OT	PWR-MOX
Uranio naturale	3.067	1.988
Conversione	0.204	0.179
Arricchimento	1.674	1.568
Fabbricazione (UO ₂)	0.554	0.785
Trasporto	0.43	0.29
Wet reprocessing	/	1.951
Fabbricazione Mox	/	1.897
Pyroprocessing	/	/
Metal fuel fab.	/	/
Stoccaggio SF	0.376	0.330
Smaltimento SF	1.972	0.519
Stoccaggio HLW	/	0.052
Smaltimento HLW	/	0.108
Fuel cycle cost	8.277	9.667

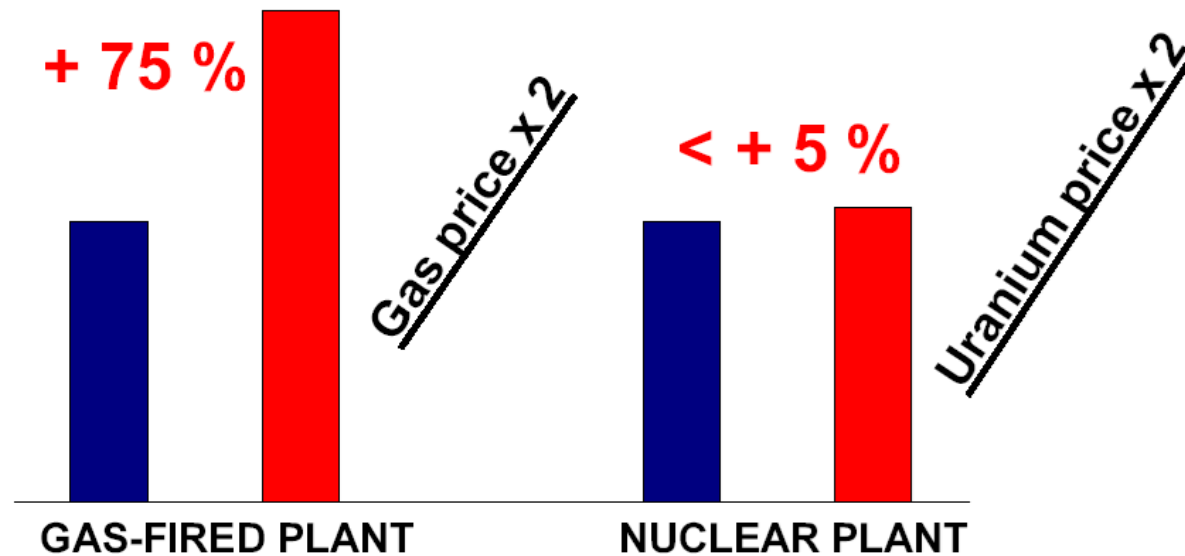
LCOE_{fuel-cycle} con due differenti approcci del back-end con suddivisione dei costi

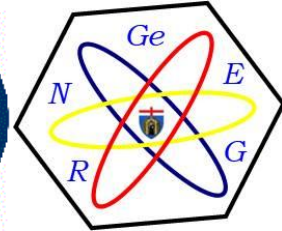


Agence pour l'énergie nucléaire
Nuclear Energy Agency



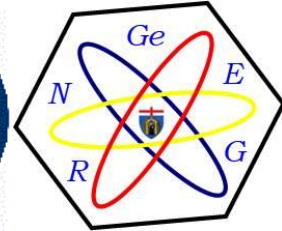
Electricity Cost Sensitivity to Fuel Price Volatility





Components of Levelized Costs [$\$/_{2012}/\text{MWh}$]

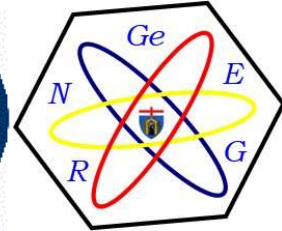
Cost Component (\$/MWh)	Nuclear	Natural Gas (No Environmental cost)	Natural Gas (With \$25/Ton CO ₂)
Capital	\$ 57.78	\$ 12.72	\$ 12.72
O&M	\$ 10.03	\$ 3.46	\$ 3.46
Fuel	\$ 5.55	\$ 46.99	\$ 46.99
Taxes ¹	\$ 9.79	\$ 10.39	\$ 10.39
Decommissioning	\$ 1.46	-	-
Waste Disposal	\$ 1.00	-	-
Environmental Compliance	-	-	\$ 9.80
TOTAL	\$ 85.61	\$ 73.55	\$ 82.35



COSTO DELL'ENERGIA ELETTRICA

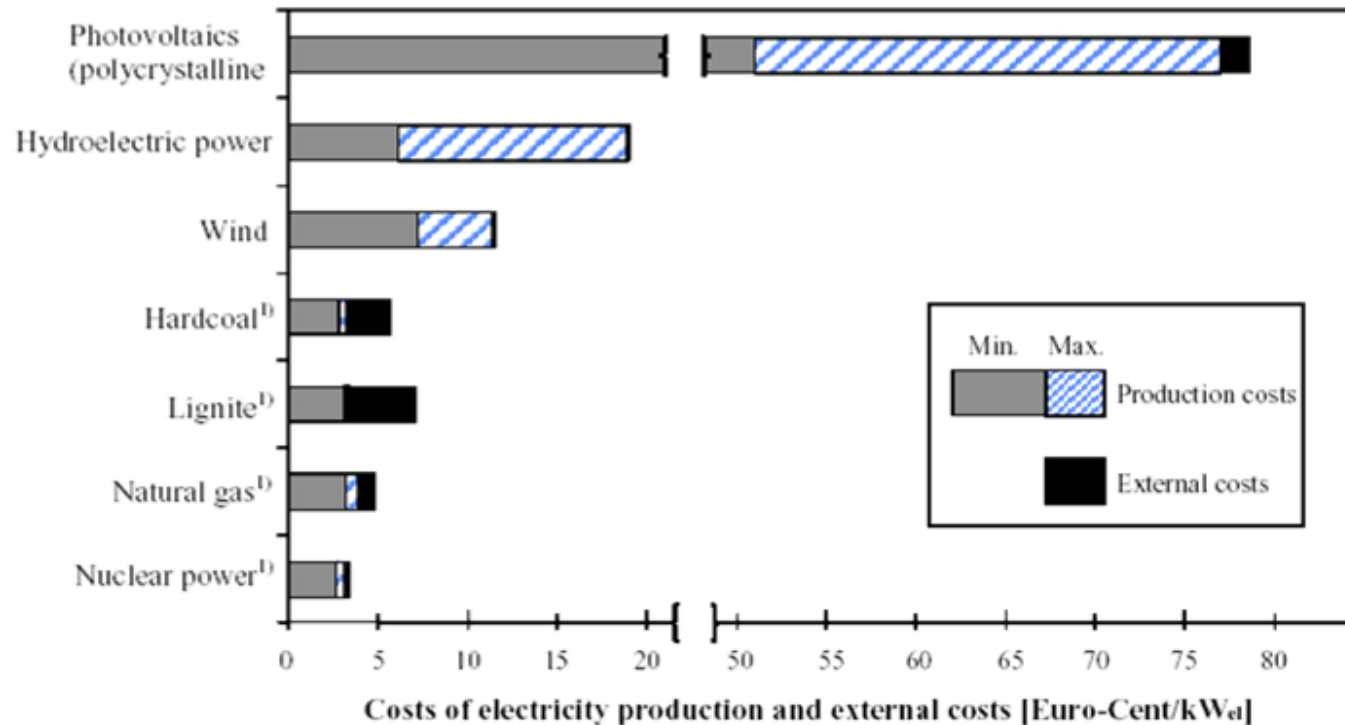
PER DIVERSE FONTI (€/MWh - ANNO 2007)

1000 MWe	NUCLEARE	CARBONE	GAS (COMBINATO)	OLIO	FOTO VOLTAICO	EOLICO
Costo capitale	6	8	4 (6)	8	645	40
Costo combustib.	5	20	122 (81)	125	0	0
Esercizio e manutenz.	11	7	20 (5)	18	30	20
Costi esterni (Decom. e waste)	(3)	16	5 (5)	10	0 (?)	0
Costo totale	25	51	151 (97)	161	675	60



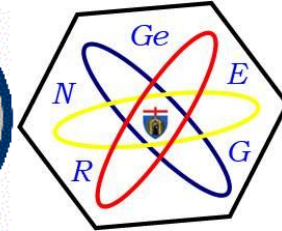
Total costs of various electricity generation technologies

Alfred Voss Institute of Energy Economics and the Rational Use of Energy, Stuttgart (D)

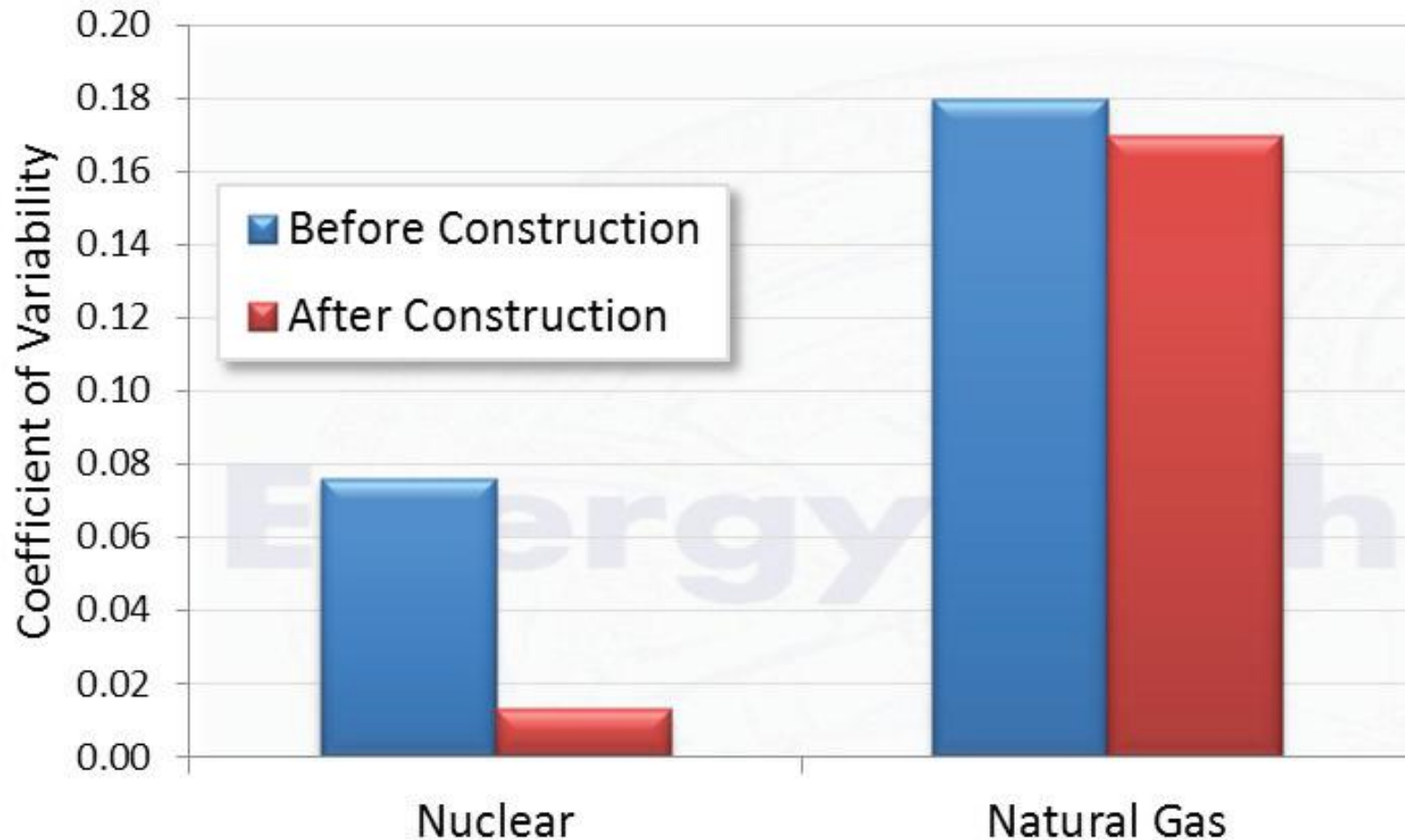


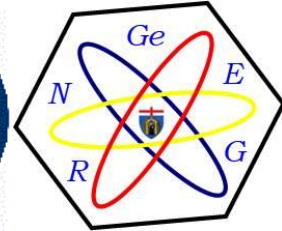
1) Base-load.

È necessario che, a livello internazionale, vengano valutati realisticamente i costi ambientali ed inglobati nei costi economici del prodotto sulla base dei meccanismi di mercato, sempre più efficaci ed a minor costo rispetto a norme governative ed a controlli burocratici

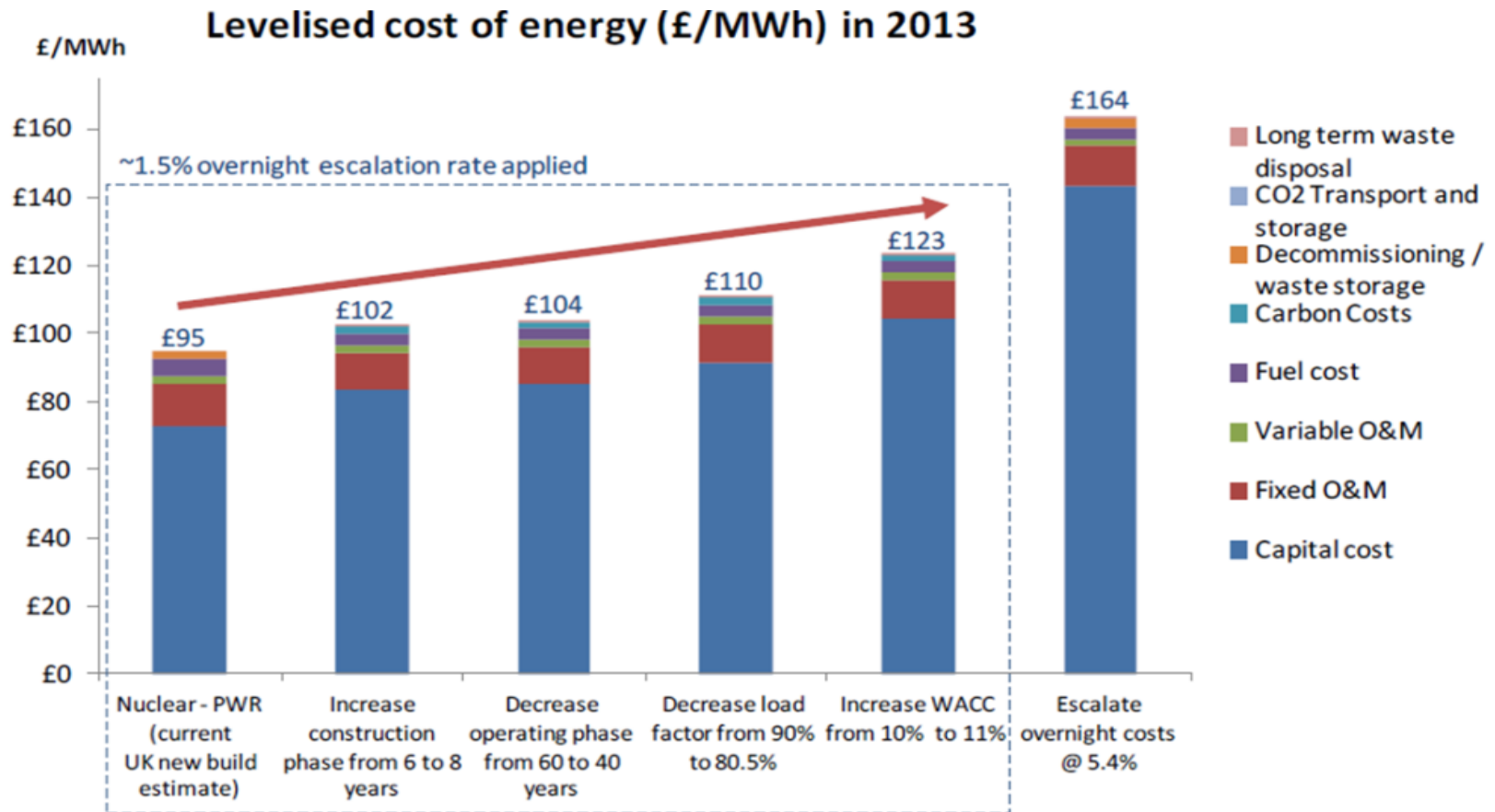


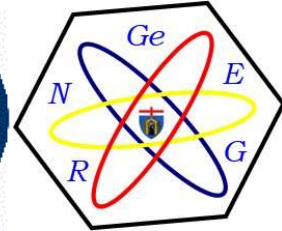
Variabilità dei costi





Sensibilità parametrica LCOE per NPP

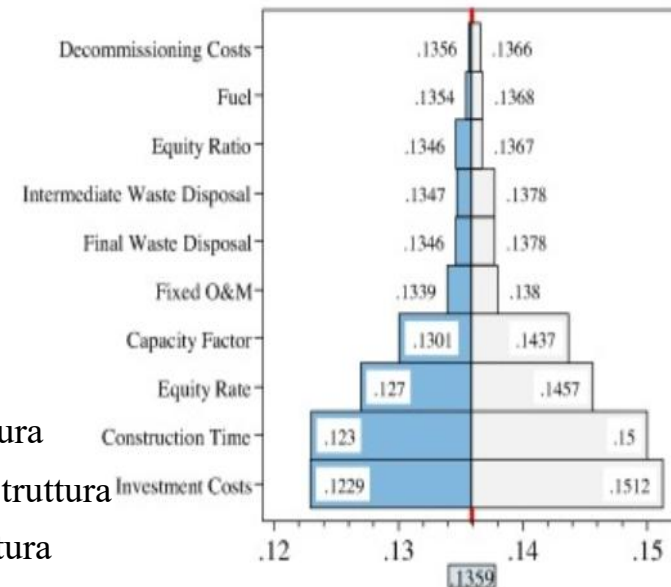


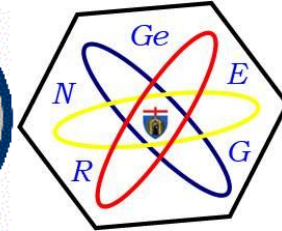


NPP LCOE: stima ed analisi di sensibilità

$$\text{LCOE} = \frac{\text{SOCC} \cdot \sum_{k=1}^{\text{CT}} W_k (1+r)^{\text{CT}-(k-1)} \cdot \text{CRF}}{8760 \cdot \text{LF}} + \frac{\text{FOM}}{8760 \cdot \text{LF}} + \text{VOM} + \text{FC}$$

- LCOE = costo livellato dell'energia [€/MWh]
- SOCC = costo di overnight specifico [€/MW]
- W_k = frazione del capitale totale speso nell'anno k
- CT = tempo di costruzione
- r = tasso di sconto
- CRF = fattore di recupero del capitale
- LF = fattore di carico
- FOM = costi O&M fissi annualizzati sulla durata di vita della struttura
- VOM = costi O&M variabili annualizzati sulla durata di vita della struttura
- FC = costi del fuel-cycle annualizzati sulla durata di vita della struttura

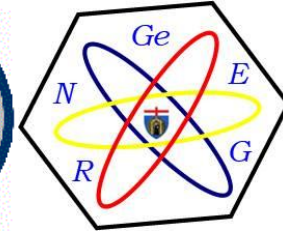




Costi per produzione elettrica nucleare

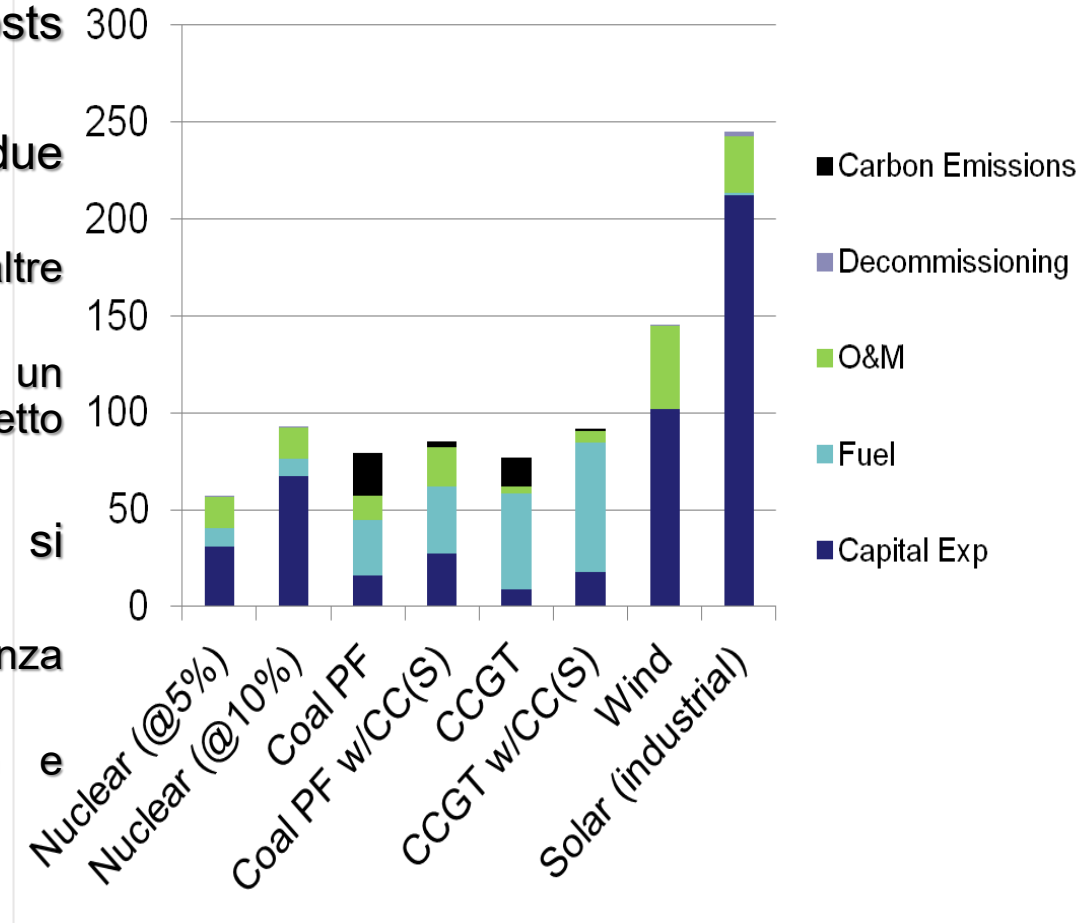
	OCC	COSTI DI INVESTIMENTO	FUEL CYCLE	O&M	LCOE tot
D'Haeseleer 2013	3320÷4250 €/kW _e	/	8.91 \$/MWh	10÷20 €/MWh	43÷89 €/MWh
IEA/NEA 2015	4249 \$/kW _e	Tasso 3%: 4555 \$/kW _e Tasso 7%: 5443 \$/kW _e Tasso 10%: 5828 \$/kW _e	9.74 \$/MWh	9.65÷14 \$/MWh	30÷125 \$/MWh
U.S. EIA 2019	/	5800 ¹ \$/kW _e	/	22.6 \$/MWh	77.5 \$/MWh
NEI 2019	/	/	/	/	33.3 \$/MWh
LAZARD 2018	/	/	/	/	112÷189 \$/MWh

1: Valore ottenuto con un WACC del 4.2%

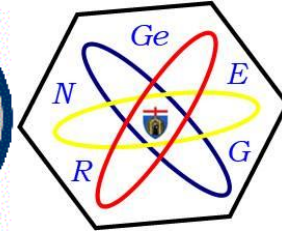


- La struttura dei costi presa a riferimento è quella pubblicata da IEA, NEI, OECD in “Projected Costs of Generating Electricity” (2010)
- Il nucleare viene proposto con due livelli di tassi di interesse:
 - 5% tasso di interesse pari alle altre fonti energetiche
 - 10% tasso che vuole esprimere un “risk premium” addizionale rispetto alle altre fonti energetiche
- Le altre fonti energetiche che si propongono sono le seguenti:
 - Carbone pulverizzato con e senza Carbon Capture
 - Turbo-gas ciclo combinato con e senza Carbon Capture
 - Esempi di rinnovabili

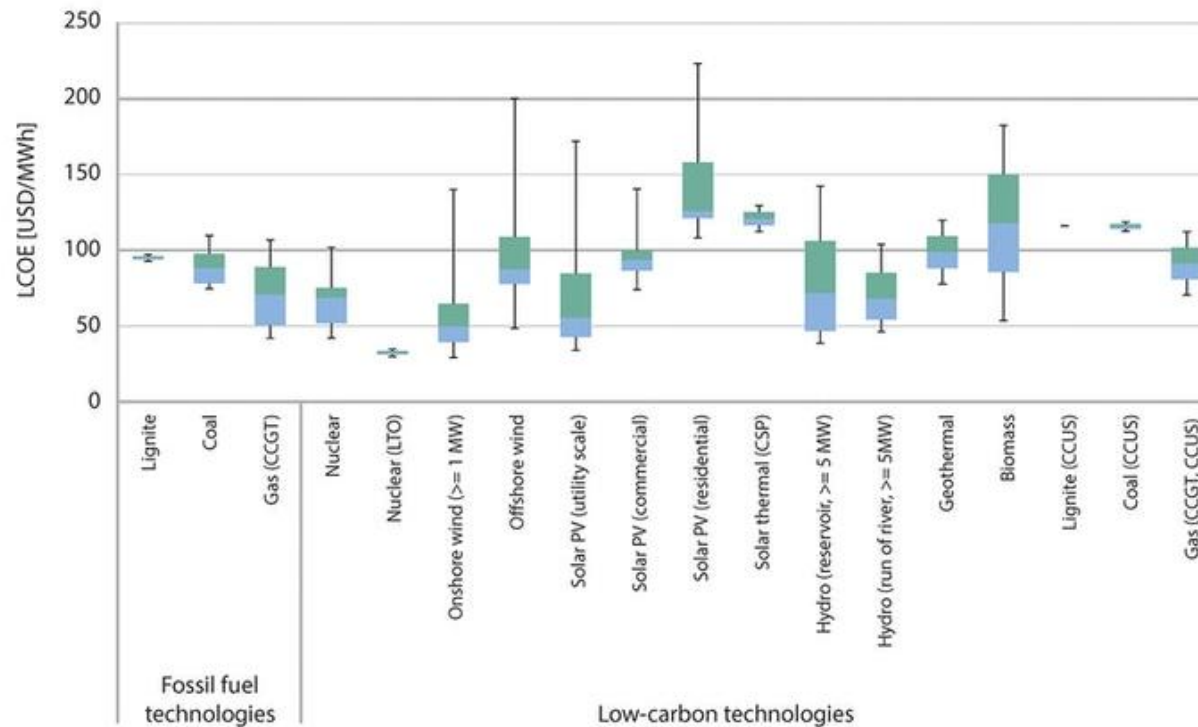
Costo MWh in USD



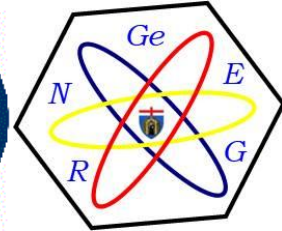
Nota: Il costo del combustibile nucleare include anche la gestione del combustibile irradiato



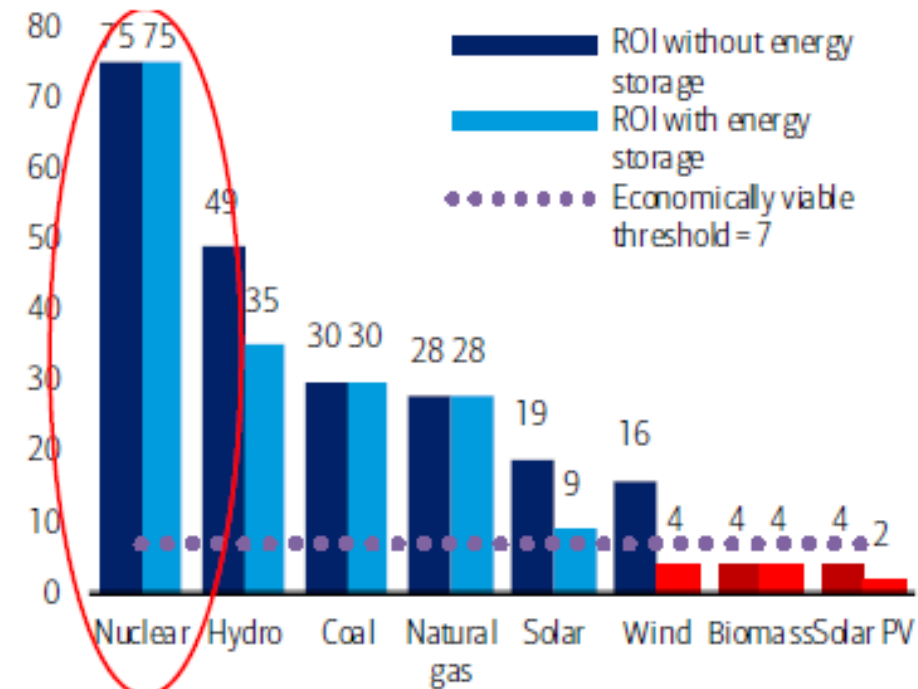
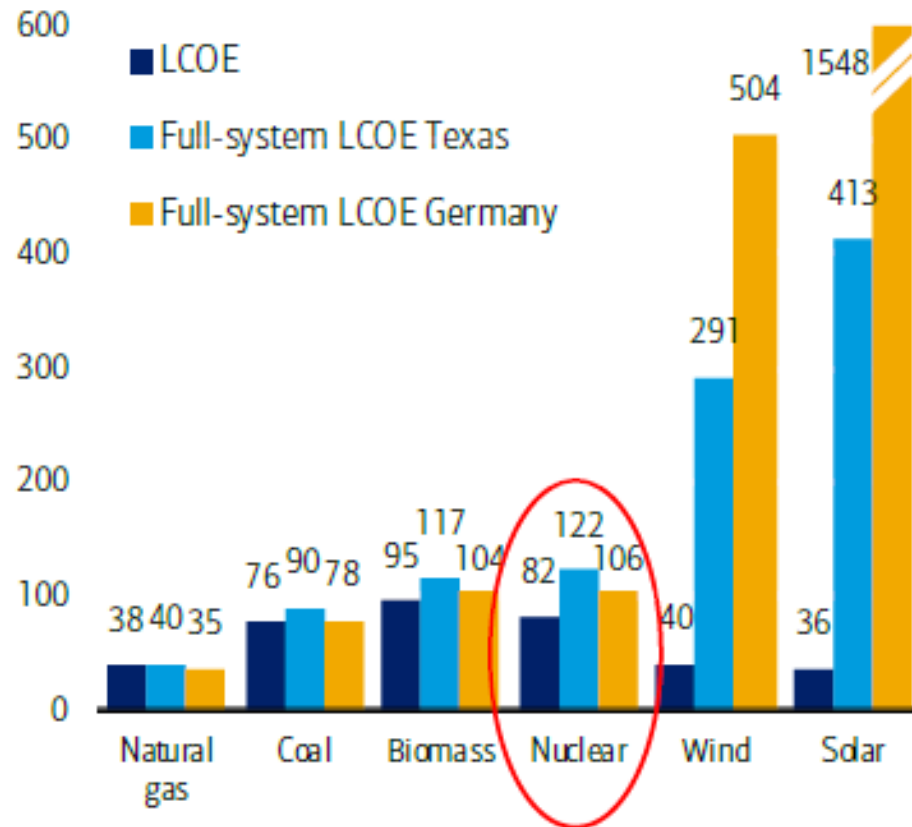
LCOE by Technology



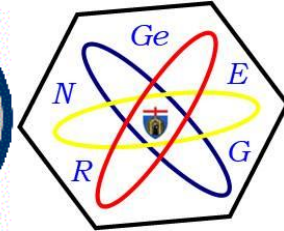
Note: Values at 7% discount rate. Box plots indicate maximum, median and minimum values. The boxes indicate the central 50% of values, i.e. the second and the third quartile.



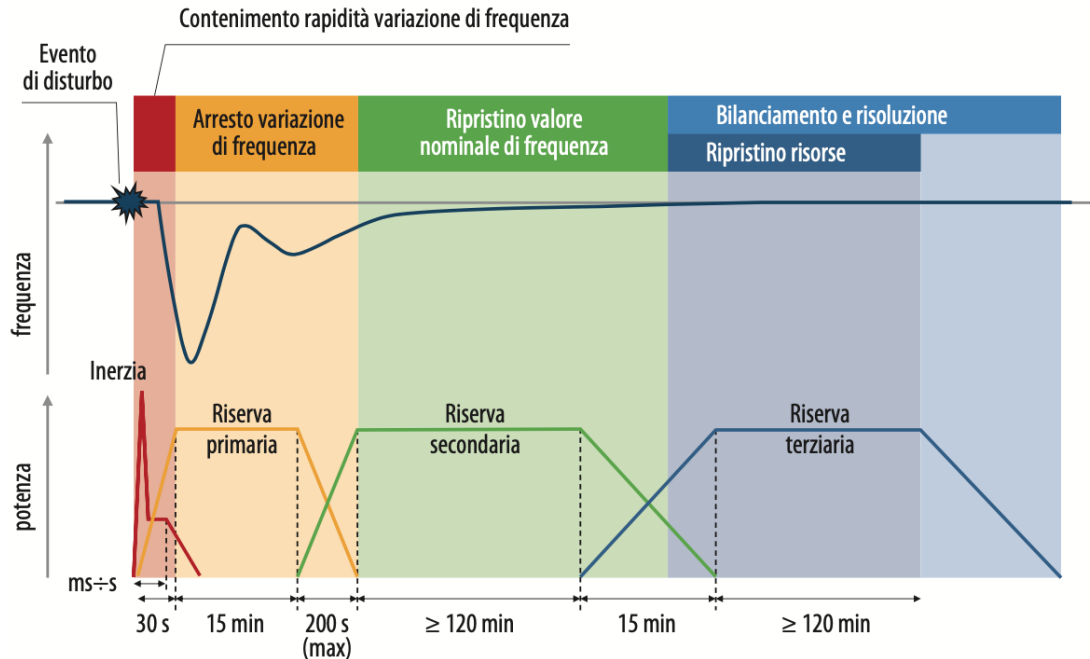
L(FS)COE & EROEI



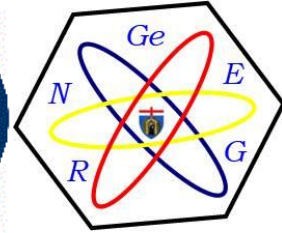
Source: BofA Research Investment Committee, D. Weißbach, G. Ruprecht, A. Huke, K. Czerski, S. Gottlie, A. Hussein; Red signals EROI below economically viable threshold



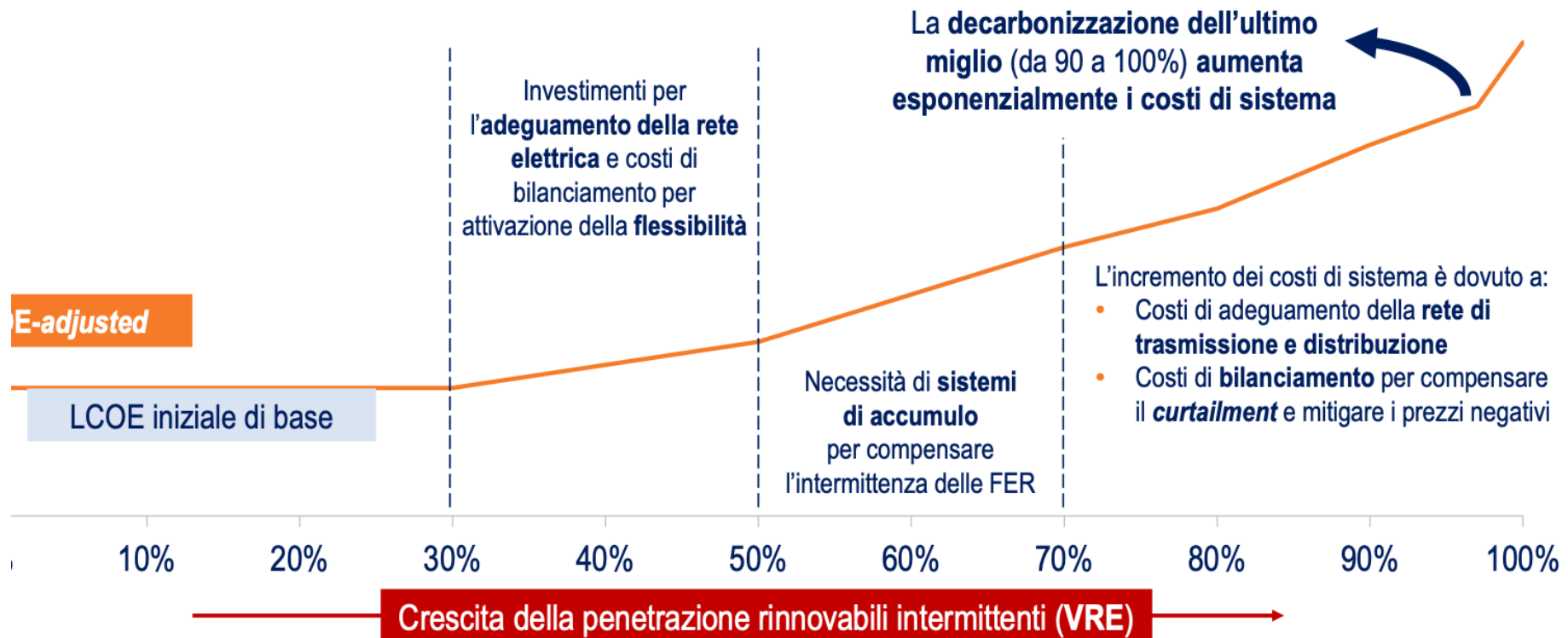
L'inerzia di rete

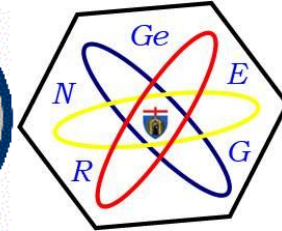


- Le riserve di potenza non sono in grado di intervenire efficacemente nei primissimi istanti successivi ad uno sbilanciamento
- In questa fase critica, un ruolo determinante è svolto dall'energia cinetica rotazionale immagazzinata nelle turbine (e.g. dei reattori nucleari)
- Queste turbine, essendo sincrone con la frequenza di rete, grazie alla loro massa ed inerzia, sono in grado di contribuire alla stabilizzazione immediata della frequenza, fornendo o assorbendo energia in modo passivo



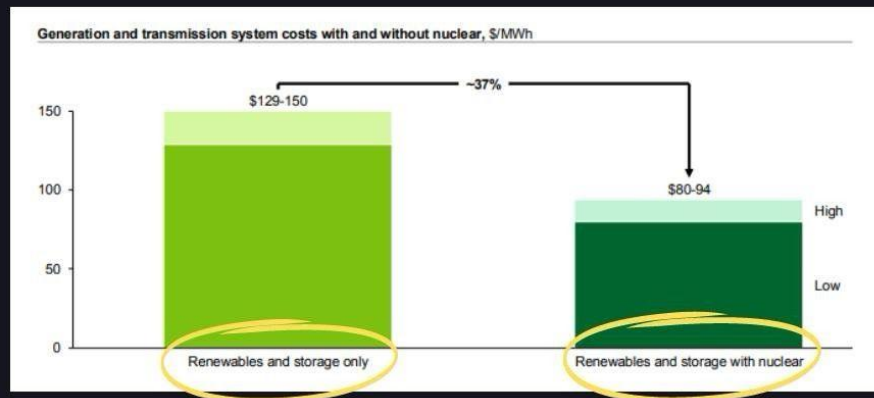
Lievitazione dei costi all'aumentare della penetrazione rinnovabile



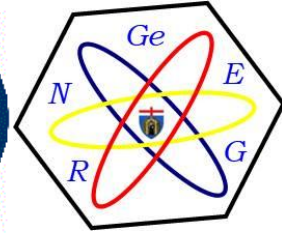


NEW REPORT

US Department of Energy



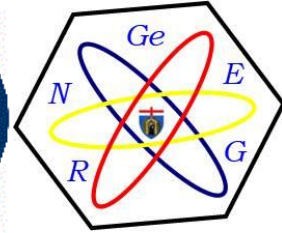
Nuclear + renewables
37% CHEAPER THAN
RENEWABLES ONLY



IL CASO FINLANDIA

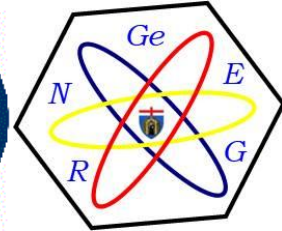
	in €/MWh				
	nucleare	carbone	ciclo combinato	legno	eolico
capital cost	13.8	7.6	5.3	13	40.1
O & M	7.2	7.4	3.5	8.2	10.0
fuel	2.7	17.9	22.4	25.6	-
emission trade	-	16.2	7.0	-	-
totale	23.7	49.1	38.2	46.8	50.1

Costi di produzione valutati in Finlandia ad Aprile 2004 per diverse alternative



Il nucleare conviene?

- L'energia nucleare non è intrinsecamente più costosa di altre, semplicemente ha i costi distribuiti in maniera diversa
- La convenienza iniziale del nucleare dipende fortemente dai tassi di interesse; guardando però a scenari a lungo termine il nucleare diventa sicuramente più allettante
- In generale, il mercato dell'energia ed i meccanismi di determinazione dei prezzi sono però molto complessi: questo fa sì che frasi come “*il nucleare è troppo costoso*” o “*il nucleare è incredibilmente conveniente*” siano, se prese in assoluto, poco significative



Conclusioni

- L'energia rappresenta allo stesso tempo il problema e la soluzione: essa infatti può essere fonte di potenziali problematiche complesse ma è soprattutto un elemento imprescindibile per uno sviluppo della nostra società veramente sostenibile sia dal punto di vista ambientale che sociale
- **Lo scienziato non è l'uomo che fornisce le vere risposte: è quello che pone le vere domande**
(Claude Lévi Strauss)
- L'energia del futuro, quella a cui bisogna giungere per garantire la sopravvivenza della civiltà umana nell'attuale prospettiva tecnologica, deve essere non nociva, inesauribile o completamente rinnovabile, ma soprattutto disponibile sempre e ovunque nel mondo, immune ai monopoli nazionali ed alle dispute politiche