

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale

«Valutazione delle emissioni di CO₂ nel ciclo di vita di tecnologie low-carbon »»

Tutor universitario: Prof. Giuseppe Zollino

Laureando: *Damiano Manganello*

Padova, 22/11/2023

Il seguente elaborato si focalizzerà sulla valutazione del ciclo di vita delle tecnologie a bassa emissione di CO₂, attraverso l'analisi Life Cycle Assessment (LCA). Si tratta di un sistema di analisi utile per valutare l'impronta ambientale che determinati beni o servizi hanno durante il loro intero ciclo di vita.

In questo capitolo verranno presentate le tecnologie low-carbon analizzate tramite LCA dall'UNECE nel rapporto *“Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources”*.

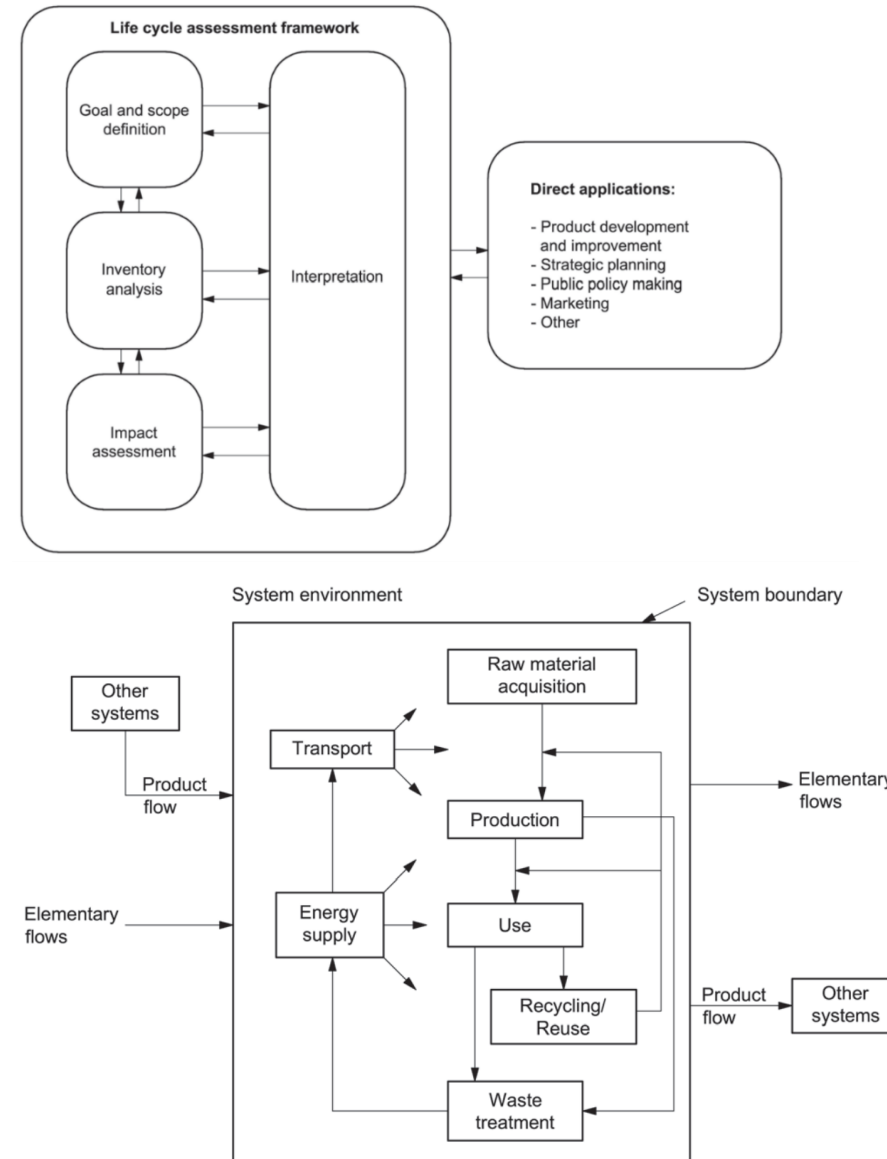
1. Metodologia LCA

2. Analisi LCA di tecnologie low-carbon

- Fotovoltaico
- Solare a concentrazione
- Idroelettrico
- Eolico
- Nucleare

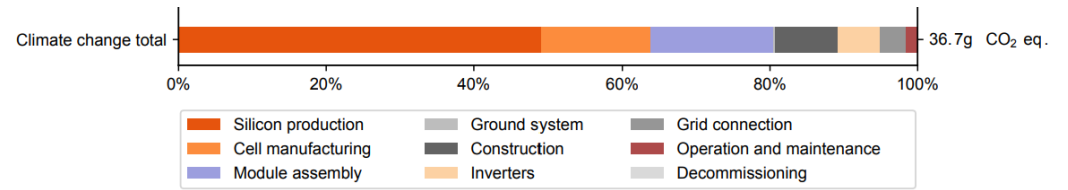
3. Analisi comparativa

1. **Goal and Scope Definition**
2. **Life Cycle Inventory Analysis (LCI):**
 - Materie prime
 - Input e output riferiti alla catena di processo principale
 - Trasporto
 - Combustibile, elettricità e calore utilizzato nel processo
 - Uso e manutenzione
 - Smaltimento di rifiuti e riutilizzo dei materiali
 - Materiali per processi ausiliari
3. **Life Cycle Impact Assessment (LCIA):** basato modello GWP (Global Warming Potential) espresso in kg di CO₂ equivalenti
4. **Interpretation**

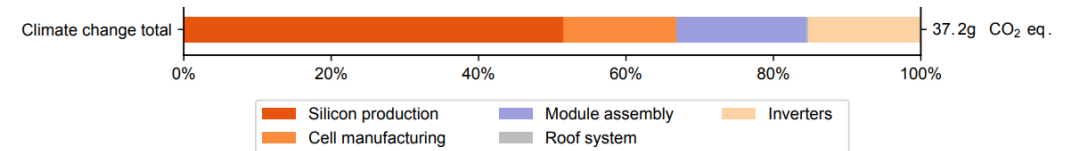


Considerando l'Europa (regione "EUR"), le tecnologie fotovoltaiche mostrano emissioni di gas serra nel ciclo di vita di circa **37 g CO₂ eq./kWh** sia per i sistemi a terra che per quelli su tetto, tenendo presente una media globale di 52/53 (terra/tetto).

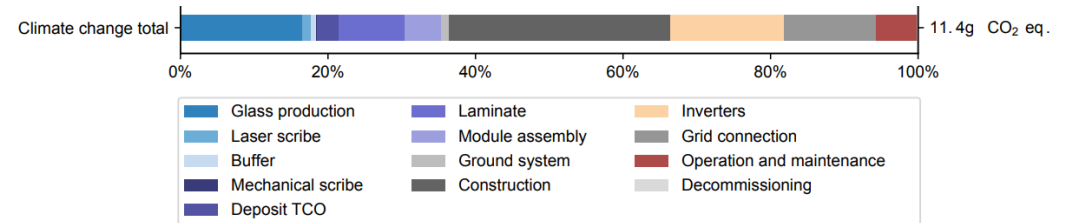
L'impatto principale delle tecnologie fotovoltaiche a base di silicio è senza dubbio il consumo di energia elettrica per la raffinazione del silicio (dalla produzione primaria alla raffinazione), che ammonta a più del 40% del totale.



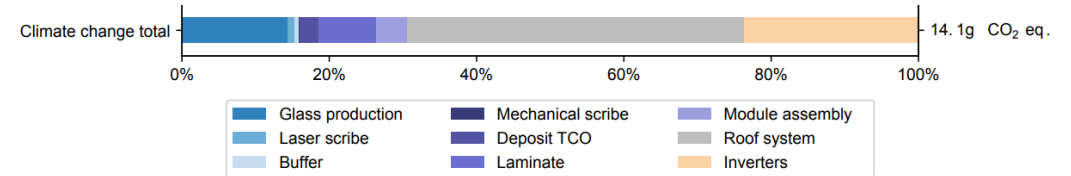
Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia fotovoltaica a terra con tecnologia al silicio cristallino



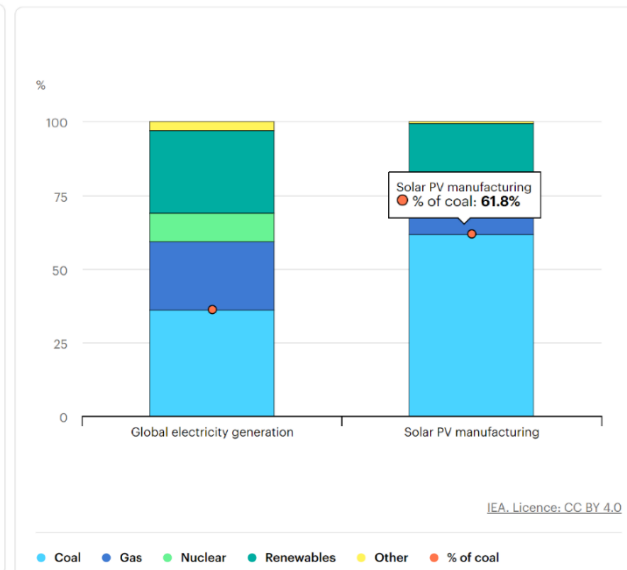
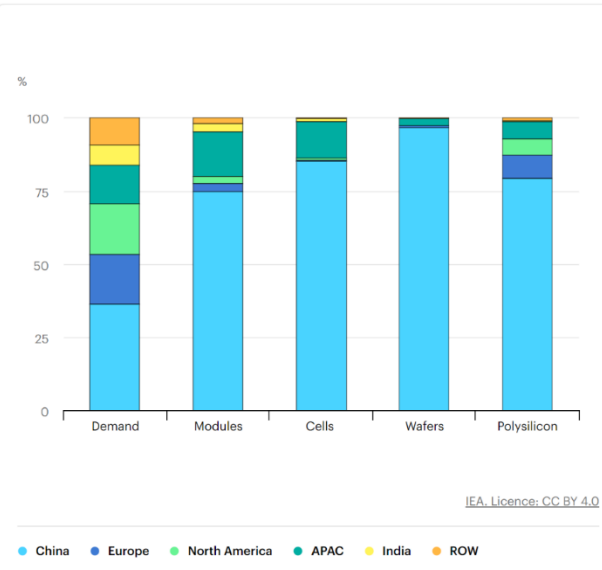
Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia fotovoltaica su tetto con tecnologia al silicio cristallino



Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia fotovoltaica a terra con tecnologia CIGS

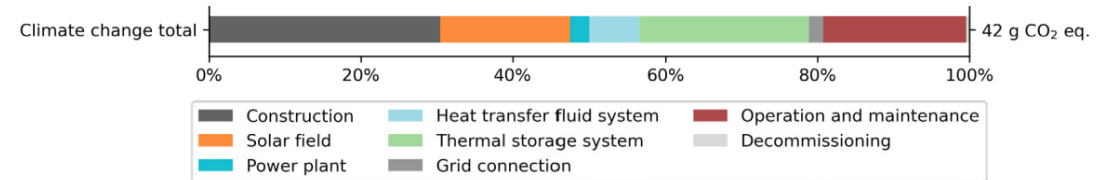


Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia fotovoltaica su tetto con tecnologia CIGS

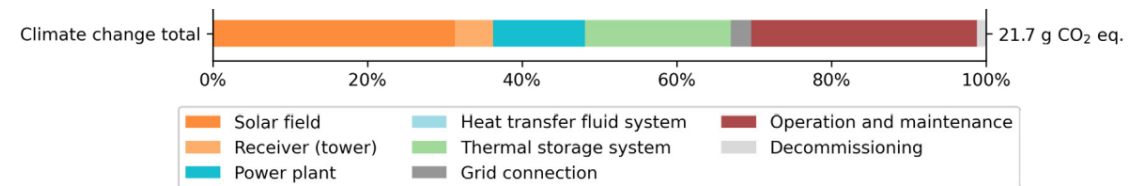


Per gli impianti a concentratori parabolici la costruzione e l'assemblaggio dell'infrastruttura sono al primo posto per le emissioni di gas serra (circa il 30%), a causa dell'uso di input energetici (elettricità e diesel) per le fasi di fabbricazione e assemblaggio. Complessivamente, la generazione di 1 kWh genera circa **42 g di CO₂ eq.** durante il ciclo di vita del sistema (in contesto europeo).

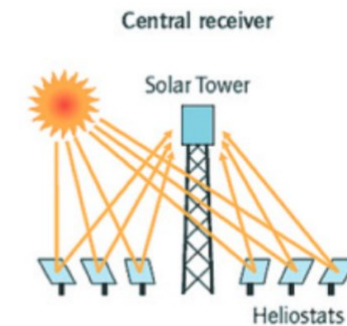
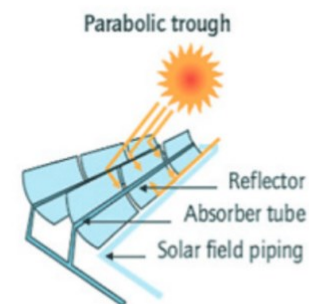
Il design a torre centrale emette significativamente meno gas serra, con circa **22 g CO₂ eq./kWh**, soprattutto grazie all'efficienza più elevata. Questa differenza è dovuta alla maggior facilità di accumulo dell'energia (fino a 6 ore al giorno di funzionamento nominale in più).



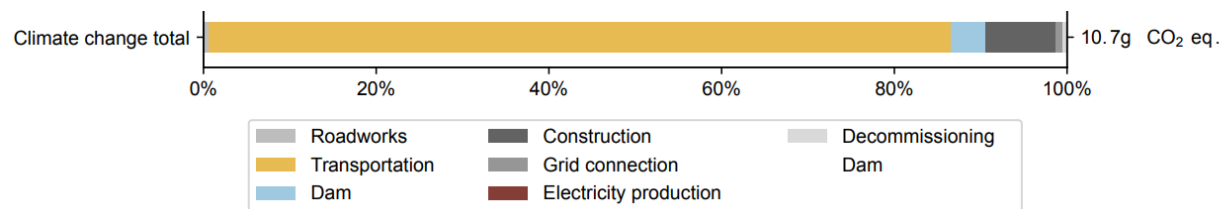
Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia tramite impianti CSP a concentratori parabolici



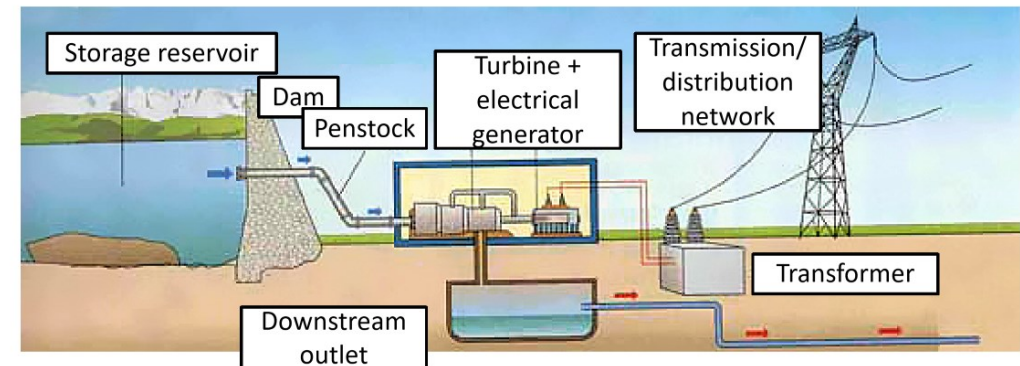
Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia tramite impianti CSP a torre



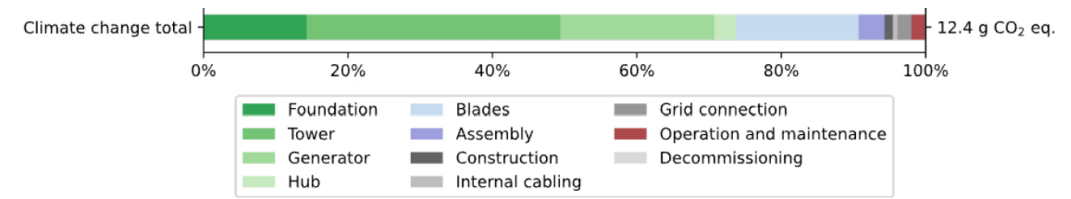
Per quanto riguarda l'energia idroelettrica le emissioni sono altamente specifiche per ogni sito, variando da **6 a 147 g di CO₂ equivalente/kWh**. Sono principalmente incorporate nel trasporto e nell'infrastruttura. In questa analisi non sono considerate le emissioni biogeniche, poiché sono altamente specifiche del sito. L'assenza di emissioni operative, una lunga durata dell'attività e alti fattori di carico fanno sì che l'energia idroelettrica abbia un ottimo comportamento dal punto di vista del cambiamento climatico.



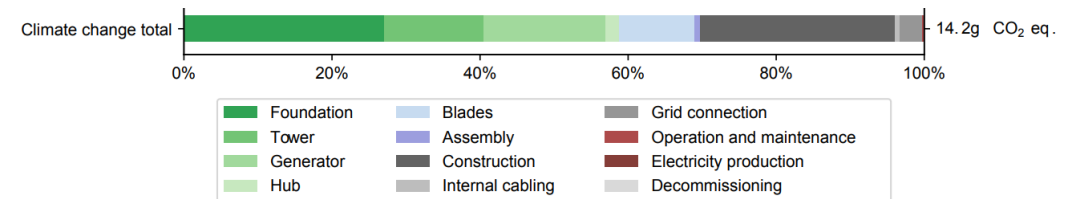
Impatto per la produzione di 1 kWh di energia idroelettrica, basata su un progetto di impianto da 360 MW



Le emissioni di gas serra variano tra 7,8 e 16 g di CO₂ equivalente/kWh per gli impianti a terra e tra 12 e 23 g di CO₂ equivalente/kWh per quelli offshore. Anche per questa tecnologia vale lo stesso discorso fatto per il fotovoltaico, ovvero che la variabilità delle emissioni dipende fortemente dal mix energetico del paese produttore.

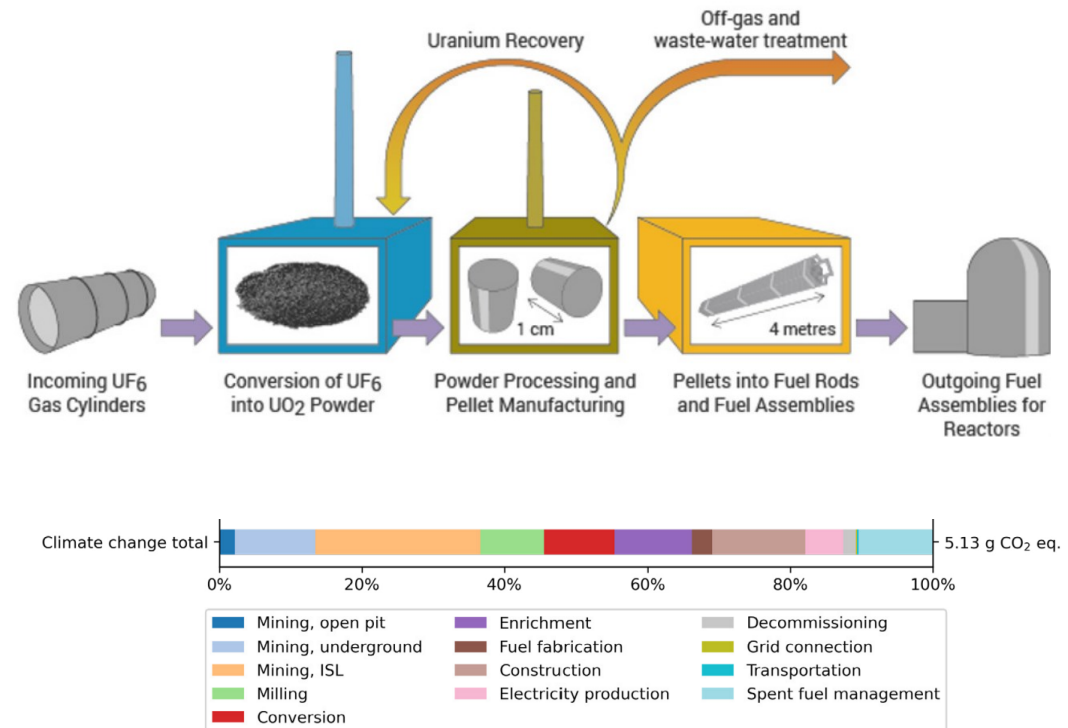


Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia eolica onshore



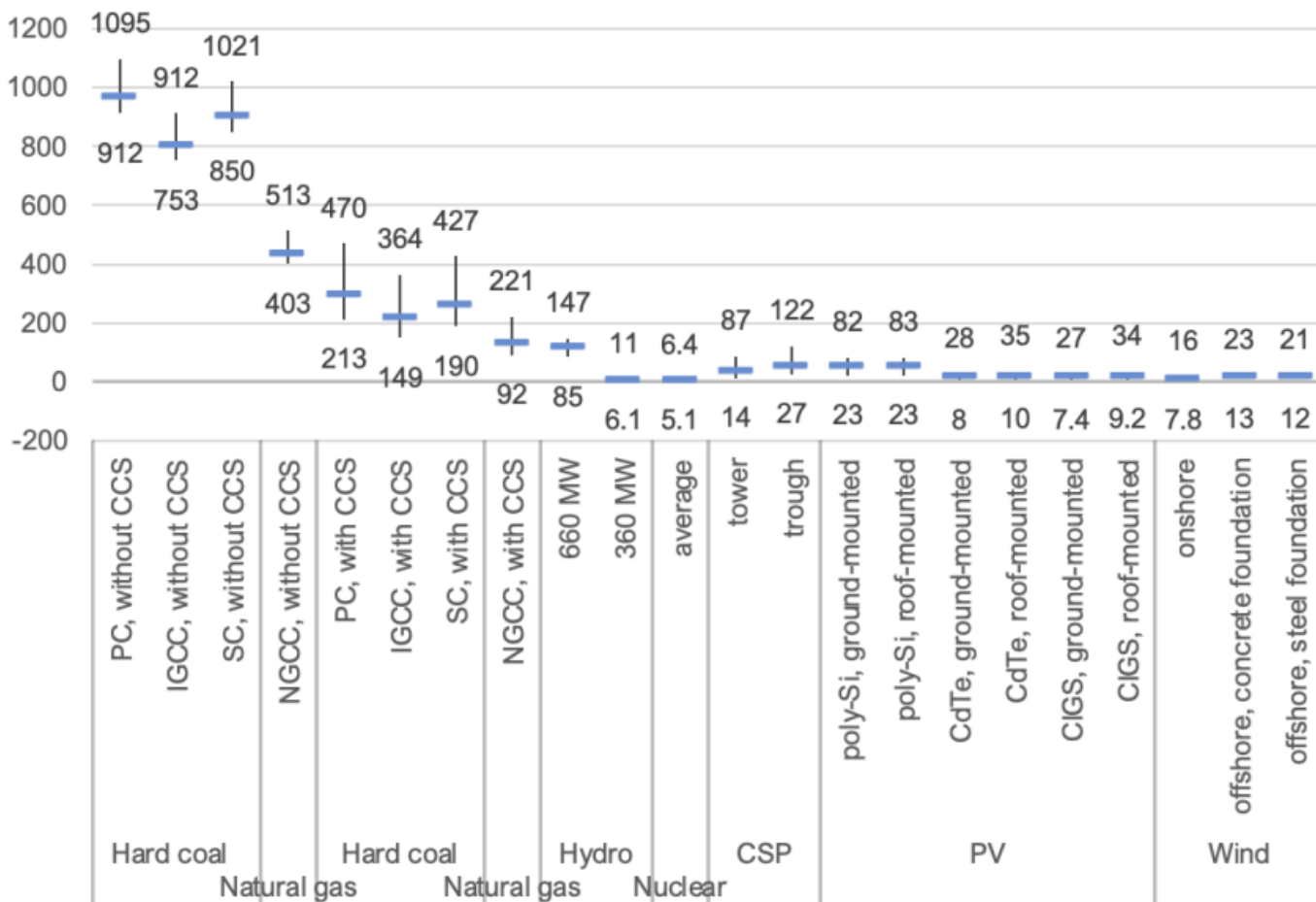
Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia eolica offshore

L'energia nucleare è stata dimostrata essere la più bassa in assoluto dal punto di vista delle emissioni. Questo grazie alla elevatissima densità energetica del combustibile nucleare e dell'assenza di combustione per la generazione di elettricità. Questo la rende senza dubbio la tecnologia con il minore impatto per quanto riguarda le emissioni di gas serra, con valori compresi tra **5,1 e 6,4 g di CO₂ equivalente/kWh**. La maggior parte delle emissioni si verificano nei processi iniziali del front-end (estrazione, conversione, arricchimento di uranio e fabbricazione del combustibile).



Impatto del ciclo di vita di 1 kWh di produzione di energia nucleare

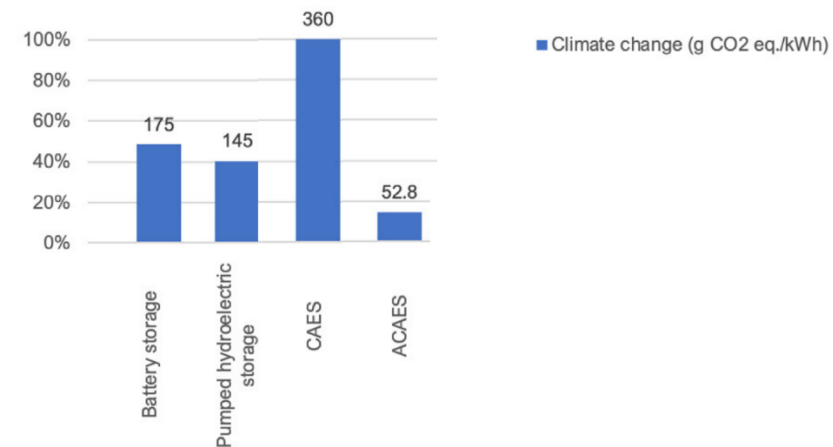
Lifecycle GHG emissions, in g CO₂ eq. per kWh, regional variation, 2020



— Average

Per avere un'idea sull'impatto dell'**accumulo** nelle tecnologie fotovoltaiche, secondo uno studio britannico, viene constatato che l'aggiunta di 4 ore di stoccaggio da 60 MW a un sistema fotovoltaico convenzionale da 100 MW aumenterebbe le emissioni di gas serra da 62 a 71–90 g CO₂ eq./kWh o da 27 a 31–39 g CO₂ eq./kWh, a seconda della chimica delle batterie.

Lifecycle impacts of electricity storage options



Possiamo concludere che, con rare eccezioni, le tecnologie rinnovabili mostrano emissioni totali di gas serra durante l'intero ciclo di vita inferiori di almeno un ordine di grandezza rispetto alle tecnologie a base di combustibili fossili (10-100 invece di 100-1000 g CO₂ eq./kWh), principalmente incorporati nell'infrastruttura.

Il trasferimento degli impatti dalla fase d'uso (nelle tecnologie tradizionali) alle altre fasi, che richiedono processi più emissivi vista la complessità delle rinnovabili, viene chiamato **impact leakage** e sarà un parametro fondamentale da mantenere sotto controllo.

Senza eccezione, ogni tecnologia di generazione di elettricità genera impatti ambientali lungo tutto il ciclo di vita, con variazioni anche molto ampie in base al sito di attuazione e alle scelte di progettazione.

Tali impatti devono essere presi in considerazione nello sviluppo dei quadri politici e delle strategie a lungo termine.