

POLITECNICO DI TORINO

I Facoltà di Ingegneria
Corso di Laurea in Ingegneria Energetica e Nucleare



Tesi di Laurea Specialistica

LA SFIDA GLOBALE DELLA SOSTENIBILITÀ ENERGETICA
Modelli e scenari futuri per l'energia e le emissioni climalteranti

Relatori:

Prof. Massimo Zucchetti

Dr. Raffaella Testoni

Candidato:

Samuele Saccone

Marzo 2020

Abstract

La comunità internazionale si sta impegnando per realizzare un processo di transizione energetica sostenibile. Al fine di verificare l'attuabilità di questo processo, occorre effettuare delle pre-analisi e delle previsioni dell'evoluzione di fattori socioeconomici ed energetici, nonché degli impatti delle emissioni climalteranti.

Le emissioni di gas serra correlate alla combustione di fossili sono aumentate significativamente dall'era preindustriale. A causa degli abbattimenti di CO₂ nel settore di produzione di potenza dei paesi più sviluppati, le emissioni globali di anidride carbonica hanno raggiunto un plateau dopo due anni di incremento relativo. Tuttavia, i dati relativi all'approvvigionamento totale di energia primaria, della produzione e dei consumi finali mostrano, ancora, una forte dipendenza globale dall'utilizzo di fonti fossili.

Il sistema climatico è un sistema complesso ed interattivo che reagisce alle perturbazioni introdotte dalle emissioni di gas serra in maniera non lineare. Gli effetti del cambiamento climatico sono già visibili sul nostro pianeta: la temperatura media superficiale terrestre continua ad aumentare, gli oceani si stanno acidificando, sia le quantità di ghiaccio che di neve stanno diminuendo, il livello del mare si sta innalzando e sta aumentando la frequenza di eventi climatici estremi.

Attraverso l'utilizzo del software free source Java Climate Model, è stato possibile valutare l'evoluzione del settore di produzione di potenza e le relative emissioni di anidride carbonica al 2050 in un'ottica di mitigazione delle emissioni. In particolare, sono stati utilizzati i database del World Population Prospect, del Penn World Table e dell'International Monetary Fund, per quanto concerne gli input socioeconomici, e l'International Energy Agency, per gli input del settore energetico, per processare quattro scenari a differente grado di potenziale tecnologico delle rinnovabili: *basso, medio, alto e irruzione tecnologica*.

Il nucleare è la seconda fonte di produzione di potenza a basse emissioni più grande al mondo. In particolar modo, la flotta globale è costituita da 452 reattori operanti che hanno prodotto circa 2700 TWh, pari al 10% della generazione elettrica complessiva. Nonostante negli ultimi 50 anni il nucleare abbia contribuito all'abbattimento di più di 60 Gt di anidride carbonica, i recenti accaduti di Fukushima hanno impattato gravemente sull'opinione pubblica e politica di questa fonte, comportando una diminuzione degli investimenti ed il ricorso a questa opzione.

L'intermittenza e la bassa modularità delle rinnovabili, nonché i conseguenti problemi di stabilità e flessibilità della rete, hanno introdotto differenti sfide tecnologiche circa la realizzazione di un parco elettrico completamente dipendente da queste fonti. Le precedenti considerazioni ben spiegano i risultati ottenuti nelle simulazioni effettuate. In particolar modo, si verifica un aumento significativo della capacità nucleare installata nel periodo 2020-2050 con dei massimi rispettivamente pari a 1821, 1367, 1284 e 519 GW, rispettivamente per gli scenari a *basso, medio, elevato potenziale ed irruzione tecnologica*. Inoltre, basandosi sulle analisi dei costi più recenti, sono stati calcolati circa 3661-10220 G\$, 2490- 6949 G\$, 2276-6352 G\$ e 302-843 G\$ di investimenti necessari per la costruzione dei nuovi impianti nucleari negli scenari a *basso, medio, elevato potenziale tecnologico e irruzione tecnologica*.

In conclusione, è possibile affermare che l'alternativa nucleare, fatta eccezione per un'eventuale irruzione tecnologica delle rinnovabili, sia indispensabile nella decarbonizzazione del sistema elettrico. Occorre, però, risolvere differenti sfide intrinseche all'utilizzo di questa fonte, quali l'ottimizzazione dell'implementazione della vita media, l'efficienza dell'industria stessa, la riduzione dei costi di investimento e l'aumento del livello di sicurezza.

Sommario

| | |
|--|-----------|
| Abstract..... | 3 |
| CAPITOLO 1- INTRODUZIONE..... | 10 |
| 1.0-Panoramica | 10 |
| 1.1- Il cambiamento climatico | 11 |
| 1.1.1-L'inequivocabile responsabilità umana..... | 11 |
| 1.1.2-Gli effetti del cambiamento climatico..... | 12 |
| 1.1.3-Le contromisure internazionali | 13 |
| 1.2-La transizione energetica globale | 14 |
| 1.2.1- La realizzazione di un sistema energetico sostenibile | 14 |
| 1.2.2- Che ruolo avrà il nucleare in questa transizione? | 15 |
| 1.2.3- Gli scenari socioeconomici ed energetici analizzati | 16 |
| 1.3-Come sta cambiando il mondo dell'energia? | 16 |
| 1.3.1-L'evoluzione dell'approvvigionamento di energia primaria a livello globale | 16 |
| 1.3.2-Le rivoluzioni energetiche e la produzione di potenza mondiale | 18 |
| 1.3.3-Il consumo finale globale: quali sono i settori più energivori? | 19 |
| CAPITOLO 2- QUADRO ENERGETICO MONDIALE | 22 |
| 2.0-Panoramica | 22 |
| 2.1- I paesi OECD | 23 |
| 2.1.1-Total primary energy supply | 23 |
| 2.1.2- Produzione | 23 |
| 2.1.3-Total final consumption | 24 |
| 2.1.4-La produzione elettrica | 24 |
| 2.2- Africa | 25 |
| 2.2.1-Total primary energy supply | 25 |
| 2.2.2- Produzione | 25 |
| 2.2.3-Total final consumption | 26 |
| 2.2.4-La produzione elettrica | 26 |
| 2.3- I paesi non OECD | 27 |
| 2.3.1-Total primary energy supply | 27 |
| 2.3.2- Produzione | 28 |
| 2.3.3-Total final consumption | 29 |
| 2.3.4-La produzione elettrica | 30 |
| 2.4- Medio Oriente | 30 |

| | |
|--|-----------|
| 2.4.1-Total primary energy supply | 30 |
| 2.4.2- Produzione | 30 |
| 2.4.3-Total final consumption | 31 |
| 2.4.4-La produzione elettrica | 31 |
| CAPITOLO 3- IL SISTEMA CLIMATICO | 32 |
| 3.0-Panoramica | 32 |
| 3.1-Le componenti del sistema climatico | 33 |
| 3.1.1-L'atmosfera | 33 |
| 3.1.2-La criosfera | 33 |
| 3.1.3- La litosfera | 34 |
| 3.1.4-La biosfera | 34 |
| 3.1.5-L'idrosfera | 35 |
| 3.2-Il global energy budget | 35 |
| 3.2.1-Il bilancio energetico sulla sommità dell'atmosfera | 35 |
| 3.2.2 L'effetto serra ed il concetto di Global Warming Potential | 36 |
| 3.2.3-Il ciclo idrogeologico | 38 |
| 3.2.4- Il ciclo biogeochimico del carbone | 39 |
| 3.2.5-Bilancio energia termica sulla superficie terrestre | 41 |
| 3.3-Il concetto di forzante e di risposta climatica | 42 |
| 3.3.1- La forzante radiativa e la forzante radiativa effettiva | 42 |
| 3.3.2- La risposta stazionaria e transitoria alle perturbazioni | 42 |
| 3.3.3-I driver naturali..... | 43 |
| 3.3.4-I driver antropogenici..... | 44 |
| CAPITOLO 4-I CAMBIAMENTI OSSERVATI ED I MODELLI CLIMATICI | 48 |
| 4.0- Panoramica | 48 |
| 4.1-I cambiamenti osservati..... | 49 |
| 4.1.1-L'innalzamento della temperatura media globale | 49 |
| 4.1.2-Lo scioglimento delle calotte polari | 50 |
| 4.1.3-Lo scioglimento del Mar Glaciale Artico | 51 |
| 4.1.4-L'nnalzamento del livello del mare e l'acidificazione degli oceani | 52 |
| 4.1.5- Intensificazione delle precipitazioni e di eventi estremi..... | 53 |
| 4.2-I modelli climatici computazionali | 54 |
| 4.2.1-Introduzione al concetto di modello climatico | 54 |
| 4.2.2- Le differenti tipologie di modello climatico | 54 |
| 4.2.3-L'incertezza nei modelli climatici | 55 |

| | |
|--|-----------|
| 4.3-JAVA CLIMATE MODEL | 56 |
| 4.3.1-Introduzione a Java Climate Model..... | 56 |
| 4.3.2- I blocchi di JCM ed il modulo <i>electricity generation</i> | 56 |
| 4.3.3-Il metodo auto-vettoriale..... | 57 |
| CAPITOLO 5- IL NUCLEARE | 59 |
| 5.0-Panoramica | 59 |
| 5.1-La situazione attuale del nucleare | 60 |
| 5.1.1-La generazione elettrica totale | 60 |
| 5.1.2- Il mercato dell'uranio..... | 60 |
| 5.1.3 Informazioni sugli impianti nucleari..... | 61 |
| 5.1.4- Il pensionamento degli impianti nucleari..... | 62 |
| 5.2Le sfide future | 63 |
| 5.2.1-Sicurezza..... | 63 |
| 5.2.2- Smaltimento e disposizione dei rifiuti..... | 64 |
| 5.2.3-Aspetti economici | 65 |
| CAPITOLO 6- DESCRIZIONE DEI MODULI DI INPUT | 68 |
| 6.0-Panoramica | 68 |
| 6.1-Schema di calcolo | 69 |
| 6.2-Economy | 69 |
| 6.2.1- Introduzione..... | 69 |
| 6.2.2-Il capitale totale..... | 69 |
| 6.2.3-Il capitale umano..... | 70 |
| 6.2.3-Tasso di risparmio | 71 |
| 6.2.4- Il prodotto interno lordo..... | 71 |
| 6.2.5-Fattore di produzione totale | 72 |
| 6.3-Demographics | 73 |
| 6.3.1-Introduzione..... | 73 |
| 6.3.2-Popolazione mondiale | 73 |
| 6.3.3-Popolazione in età lavorativa..... | 73 |
| 6.3.4-Tasso di fertilità..... | 74 |
| 6.3.5-Flusso migratorio netto..... | 75 |
| 6.3.6-Tasso di dipendenza..... | 75 |
| 6.4- Energy | 76 |
| 6.4.1-Introduzione..... | 76 |
| 6.4.2-Scenario di riferimento WEO | 76 |

| | |
|--|-----------|
| 6.4.3-Carbon price..... | 78 |
| 6.4.4-Elasticità della domanda | 79 |
| 6.4.5-Potenziale tecnologico delle rinnovabili | 80 |
| CAPITOLO 7-RISULTATI DELLA SIMULAZIONE..... | 82 |
| 7.1- Basso potenziale tecnologico | 83 |
| 7.1.1 -Evoluzione del parco elettrico..... | 83 |
| 7.1.2-Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica | 85 |
| 7.2-Potenziale tecnologico medio | 87 |
| 7.2.1-Evoluzione del parco elettrico..... | 87 |
| 7.2.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica | 88 |
| 7.3-Potenziale tecnologico elevato..... | 90 |
| 7.3.1-Evoluzione del parco elettrico..... | 90 |
| 7.3.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica | 91 |
| 7.4-Irruzione tecnologica | 92 |
| 7.4.1-Evoluzione del parco elettrico..... | 92 |
| 7.4.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica | 94 |
| 7.5-Analisi del contributo nucleare | 95 |
| 7.5.1-Analisi della capacità nucleare installata futura | 95 |
| 7.5.2-Investimenti nel settore nucleare..... | 96 |
| 7.5.3- Le possibili riduzioni dei costi di investimento e generazione..... | 98 |
| 8-CONCLUSIONI E COMMENTI..... | 101 |
| Bibliografia | 102 |

CAPITOLO 1- INTRODUZIONE

1.0-Panoramica

L'obiettivo di questo capitolo è fornire le informazioni principali relative al cambiamento climatico a cui stiamo assistendo, riportarne i principali effetti, dimostrare le inequivocabili responsabilità umane e discutere le principali contromisure della comunità internazionale. Successivamente, si introduce il concetto di transizione energetica e si riportano alcune considerazioni sul contributo del nucleare nell'abbattimento delle emissioni di gas serra. È necessario, infine, riportare un quadro dei cambiamenti nell'approvvigionamento dell'energia e nei consumi finali al fine di fornire le chiavi di lettura per interpretare la portata e l'attuabilità della transizione energetica globale necessaria a mitigare gli impatti del cambiamento climatico sul nostro ecosistema.

1.1- Il cambiamento climatico

1.1.1-L'inequivocabile responsabilità umana

Il sistema climatico è un sistema complesso ed interattivo costituito dall'atmosfera, dalla superficie innevata e ghiacciata, dagli oceani e dai corpi idrici, dalla superficie terrestre e dagli esseri viventi che lo popolano. Esso evolve nel tempo sotto l'influenza della propria variabilità interna e di alcuni fattori esterni. Le forzanti esterne includono sia fenomeni naturali, come la variazione dell'irraggiamento solare e le eruzioni vulcaniche, che antropogeniche, come la variazione della composizione atmosferica indotta dall'emissioni di gas serra ed altri inquinanti.

L'influenza di fattori esterni sul clima può essere analizzata utilizzando il concetto di forzante radiativo¹ (*approfondimenti nel CAPITOLO 3*). Un forzante radiativo positivo, come quello prodotto da concentrazioni crescenti di gas a effetto serra, tende a riscaldare la superficie; mentre un forzante radiativo negativo, che può derivare da un aumento di alcuni tipi di aerosol, tende a raffreddarla. Effettuando un bilancio energetico globale, è possibile calcolare il forzante radiativo netto alla tropopausa e valutarne i vari contributi. Gli studi più recenti hanno dimostrato che il forzante radiativo totale è positivo e che, quindi, il sistema climatico sta effettivamente assorbendo un quantitativo maggiore di energia. Il maggior contributo è correlato all'aumento dell'emissioni di gas serra e, in particolare, all'aumento di emissioni antropogeniche di anidride carbonica.

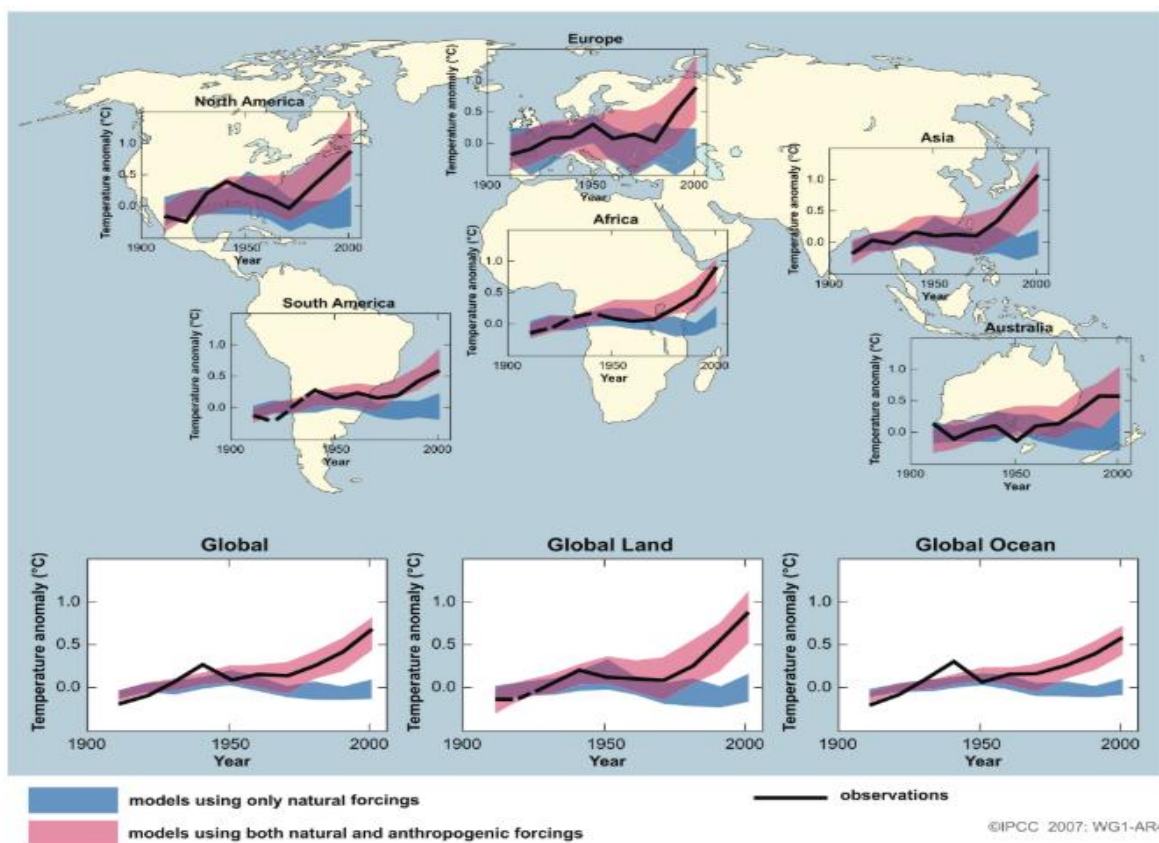


Figura 1: Variazione della temperatura media rispetto alla media per il periodo 1901-1950. La linea nera rappresenta la variazione di temperatura osservata, mentre la banda colorata rappresenta il range combinato del 90% delle simulazioni dei modelli climatici più recenti. Le simulazioni che considerano sia fattori naturali che umani è riportata in rosa, mentre quelle che considerano solo fattori naturali in blu. La linea tratteggiata indica la mancanza di dati osservati per il periodo in questione. **Fonte: IPCC AR4**

¹ Esso è la differenza tra l'irraggiamento solare, ossia l'energia entrante, assorbito dalla Terra e l'energia irradiata nello spazio, vale a dire l'energia uscente. Viene misurato in W/m².

Al fine di eliminare gli scetticismi relativi all'inconsistenza scientifica del cambio climatico, la comunità internazionale ha deciso di valorare questa teoria attraverso delle simulazioni computazionali inerenti all'evoluzione del sistema climatico nel secolo scorso. L'utilizzo di modelli molto evoluti ha permesso di processare questa evoluzione in funzione del solo squilibrio radiativo introdotto dalla variabilità naturale ed in funzione dello squilibrio totale introdotto da ciclicità naturale e fonti antropogeniche. Confrontando questi risultati ai dati storici terrestri e satellitari, si è evinta l'inequivocabile responsabilità umana (**Figura1**).

Inoltre, la disuniformità con cui si sta riscaldando l'atmosfera e le ricostruzioni paleoclimatiche hanno fornito una maggiore consistenza a questa teoria. La troposfera, ossia lo strato che si estende dal suolo fino a 10-15 km, è caratterizzata da un valore di temperatura media in aumento; mentre la stratosfera, lo strato immediatamente soprastante alla troposfera, è caratterizzata da un progressivo raffreddamento. Le ricostruzioni paleoclimatiche hanno permesso di risalire ai dati riguardanti le condizioni climatiche di migliaia di anni fa, permettendo alla comunità scientifica di intuire le inconfondibili relazioni tra gas serra presenti nell'atmosfera e temperatura media superficiale, nonché dell'effetto regolatore del relativo effetto serra [1] [2].

1.1.2-Gli effetti del cambiamento climatico

Gli effetti del cambiamento climatico sono già visibili sul nostro pianeta (**Figura 2**): la temperatura media superficiale terrestre continua ad aumentare, gli oceani si stanno acidificando, sia le quantità di ghiaccio che di neve stanno diminuendo, il livello del mare si sta innalzando e sta aumentando la frequenza di eventi climatici estremi. La biosfera, da cui l'umanità intera dipende, viene alterata con un grado senza precedenti in tutte le scale spaziali. La biodiversità tra differenti specie viventi e tra specie viventi ed ecosistemi sta declinando più velocemente che in qualsiasi altro momento della storia umana [3].

La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera continua a presentare un andamento positivo ed ha raggiunto il valore medio di 412 ppm, valore più elevato degli ultimi 850.000 anni. L'abbondanza relativa di questo gas è aumentata di più del 40% dai tempi preindustriali, principalmente a causa dell'utilizzo e la produzione di combustibili fossili e, secondariamente, a causa delle emissioni nette legate alle variazioni d'uso del territorio. L'oceano ha assorbito circa il 30% delle emissioni antropogeniche di CO₂, fenomeno che ha comportato l'acidificazione di questi ultimi.

La temperatura media globale è in continuo aumento sin dalla prima rivoluzione industriale ed ha raggiunto i picchi massimi nell'ultimo ventennio. A partire dal 2001, sono stati registrati diciotto tra i diciannove anni più caldi a partire dal 1880. In particolare, si registra una variazione della temperatura media di 0,83° C nel 2018 riferito alla temperatura media del periodo 1951-1980.

L'estensione superficiale ghiacciata del mar Glaciale Artico raggiunge il suo valore minimo ogni settembre. Confrontando i valori minimi a partire dal 1979, se ne calcola una diminuzione relativa del 12,85 % per decade relativa al valore medio del periodo 1981-2010.

I dati del satellite Grace mostrano che sia la calotta polare dell'Antartico che quella della Groenlandia continuano a perdere massa. Nel 2017, si è registrata una perdita di massa della calotta polare artica di 1870 (± 175) Gt², mentre in Groenlandia di 3771 (± 98) Gt, riferite ai valori dell'anno di riferimento 2002.

Il bilancio energetico globale ha evidenziato che circa il 93% del calore in eccesso viene assorbito dagli oceani in maniera non uniforme. In particolare, il 60% di questo calore viene assorbito dai primi 700 m di profondità media e ha comportato una variazione di 0,09-0,13 °C; mentre la restante

componente viene assorbita dalla parte sottostante. L'espansione termica dell'acqua marina e lo scioglimento dei ghiacciai sono i fattori primari dell'innalzamento del livello del mare [2] [4].

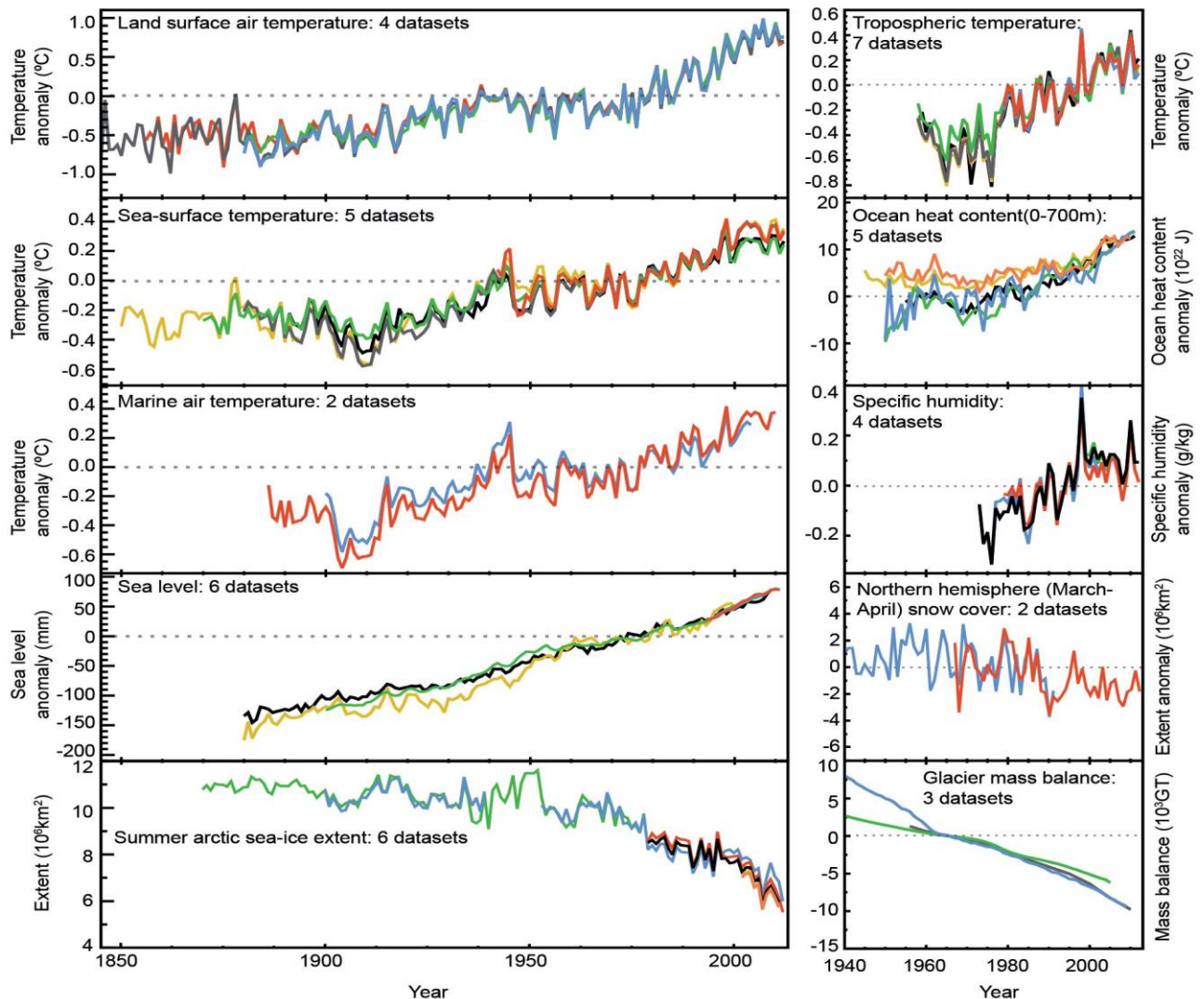


Figura 2: Indicatori del cambio climatico. In figura vengono riportati differenti indici del cambiamento climatico e le relative anomalie in termini di temperatura, massa, energia e lunghezza. I differenti colori rappresentano l'utilizzo di database differenti. **Fonte: NOAA/NCEI**

1.1.3-Le contromisure internazionali

La Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC) è l'accordo internazionale più importante sulle azioni per contrastare il cambio climatico e ridurre le emissioni di gas serra. Finora è stata ratificata da 197 paesi. Il trattato, come stipulato originariamente, non poneva limiti obbligatori per le emissioni di gas serra alle singole nazioni; era quindi, sotto questo profilo, legalmente non vincolante.

Esso però includeva la possibilità che le parti firmatarie adottassero, in apposite conferenze, atti ulteriori, denominati protocolli, che avrebbero posto i limiti obbligatori di emissioni. L'UNFCCC ha affidato il compito ad ogni nazione firmataria di istituire inventari nazionali dei gas a effetto serra per le emissioni e gli assorbimenti degli stessi, dati che sono stati utilizzati per creare i livelli di riferimento del 1990.

Le parti della convenzione si sono riunite annualmente, a partire dal 1995, in conferenze delle parti (COP) per valutare i progressi compiuti nella lotta contro il cambiamento climatico. Nel 1997, il **protocollo di Kyoto** è stato concluso e ha stabilito obblighi giuridicamente vincolanti per i paesi sviluppati per ridurre le emissioni di gas a effetto serra nel periodo 2008–2012. La Conferenza delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici del 2010 ha concluso un accordo in base al quale il futuro riscaldamento globale dovrebbe essere limitato a meno di 2,0°C rispetto al livello preindustriale. Il protocollo è stato modificato nel 2012 per includere un secondo periodo di impegno che andava dal 2013–2020 **nell'emendamento di Doha**. Nel 2015 è stato adottato l'**accordo di Parigi**, che disciplina le riduzioni delle emissioni a partire dal 2020 attraverso gli impegni dei paesi a raggiungere contributi determinati su base nazionale nel contrasto al cambiamento climatico.

A global carbon law and roadmap to make Paris goals a reality

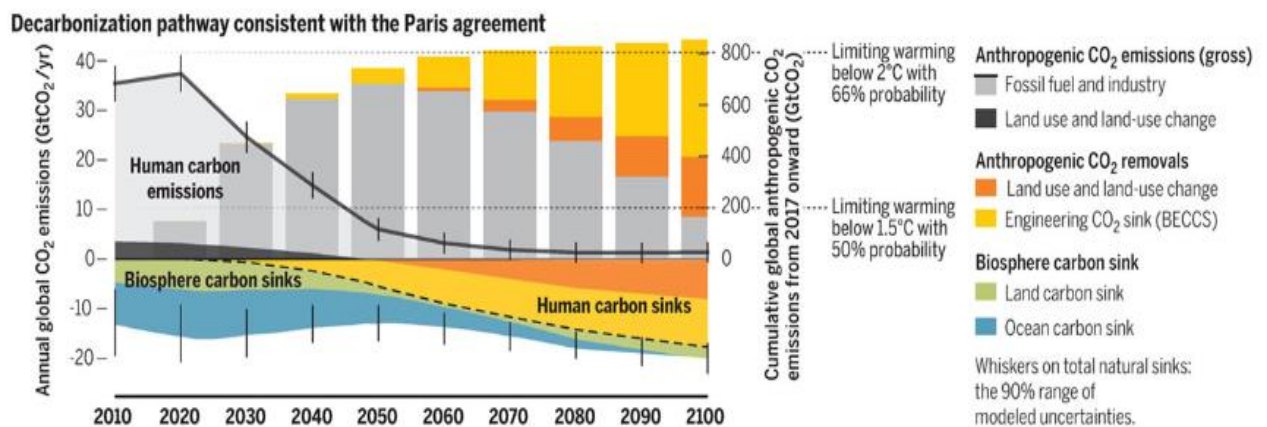


Figura 3: Percorso di decarbonizzazione compatibile con l'accordo di Parigi. Evoluzione delle emissioni basate sulla sostituzione totale del carbone nel 2030 e del petrolio nel 2040, l'utilizzo di pozzi carboniosi naturali ed ingegneristici e un potenziale delle rinnovabili non lineare basato sui trend globali del 2005-2015. **Fonte: N. CARY/SCIENCE**

In particolare, l'accordo di Parigi ha fornito indicazioni sul carbon budget³ associato ad una probabilità del 50% di limitare il cambiamento climatico a 1,5°C e maggiore del 66% ai 2°C al 2100. Ciò prevede che le emissioni annue debbano avere un picco nel 2020 pari a circa 40 GtCO₂, diminuire nel 2030 a circa 24 GtCO₂, raggiungere le 14 GtCO₂ nel 2040 e, infine, le 4 GtCO₂ nel 2050 (**Figura 3**).

1.2-La transizione energetica globale

1.2.1- La realizzazione di un sistema energetico sostenibile

La concentrazione di anidride carbonica nell'atmosfera continua a crescere vertiginosamente ed ha, recentemente, raggiunto il valore medio di 412 ppm. In termini di flussi massici, le emissioni globali di questo gas sono aumentate da 2 Gt nel 1900 a più di 33 Gt nel 2018. Contrariamente a quanto sperato, i dati odierni hanno riportato un'ulteriore crescita annua percentuale nel 2018 e nel 2019, rispettivamente del 2,7% e dello 0,6%.

Il settore energetico fornisce un contributo preponderante nelle emissioni di gas a effetto serra, costituendo circa il 35% delle emissioni totali nel 2010. Occorre specificare, anche, che è il settore che presenta un tasso relativo di emissioni maggiore: esso ha, difatti, contribuito al 47% dell'incremento di emissioni di gas serra nel periodo 2000-2010. Considerando, inoltre, le recenti

³ Il carbon budget è il quantitativo di emissione associato a rimanere sotto una certa soglia di variazione di temperatura media superficiale.

proiezioni della domanda di energia in funzione dei driver demografici ed economici; si intuisce l'impellenza di effettuare una transizione energetica verso fonti pulite [5] [6].

Greenhouse Gas Emissions by Economic Sectors

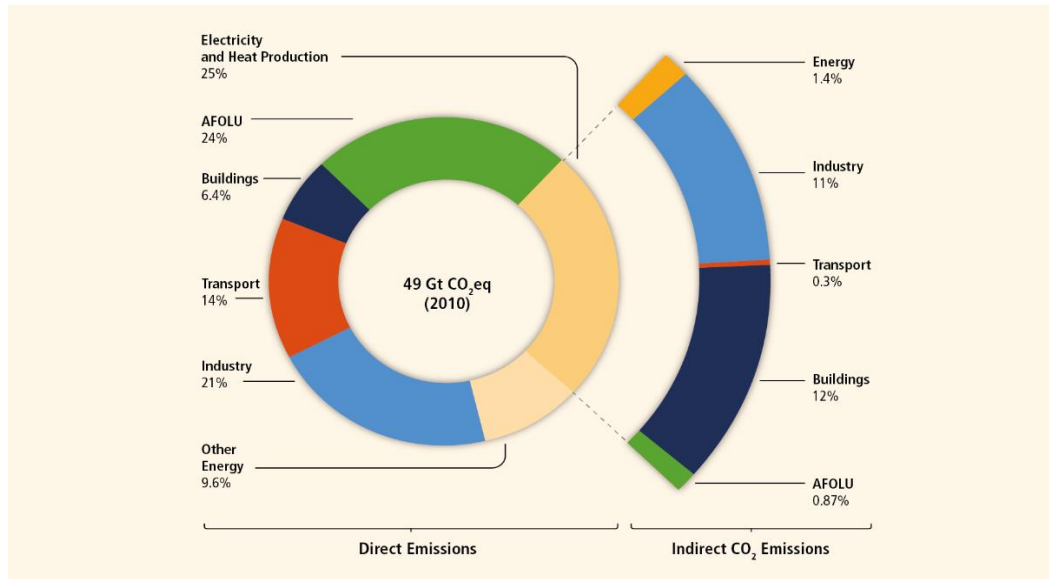


Figura 4: Emissioni di gas serra per settore. Al centro viene riportato il valore delle emissioni di gas serra in Giga-tonnellate all'anno. Il grafico a torta interno riporta il relativo contributo dei settori economici, mentre il grafico a torta esterno riporta le emissioni indirette di anidride carbonica dal settore di produzione di potenza e calore. **Fonte: IPCC AR4**

1.2.2- Che ruolo avrà il nucleare in questa transizione?

Le preoccupazioni ambientali sollevate dalla IPCC, la necessità di una maggiore sicurezza di approvvigionamento energetico ed il bisogno di accedere a prezzi con costi di produzione stabili e bassi hanno comportato un progressivo interessamento all'energia nucleare.

A causa, però, dell'incidente nella centrale nucleare di Fukushima Daiichi e del forte impatto che questo ha avuto sulla opinione pubblica, questa tendenza ha subito una decrescita notevole nel 2011. Inoltre, questo rallentamento è, indubbiamente, imputabile alla crisi finanziaria del 2008-2009 e la conseguente crisi economica, che ha portato ad una riduzione delle capacità di finanziamento degli istituti di credito e alla diminuzione della domanda di elettricità nei paesi maggiormente colpiti dalla crisi.

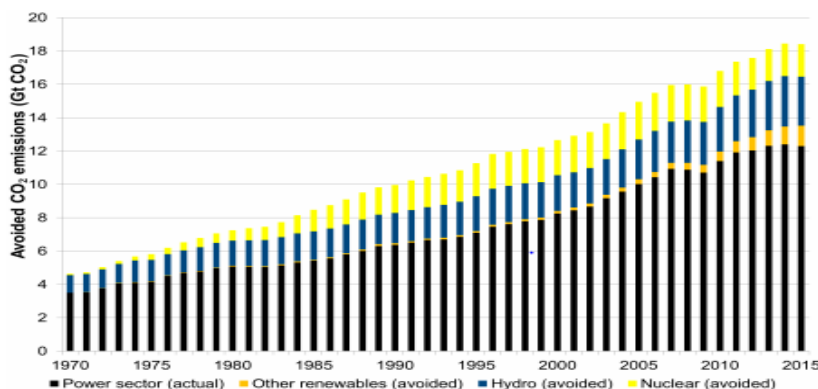


Figura 5: Emissioni di anidride carbonica evitate nel settore di produzione di potenza. La parte nera della colonna rappresenta le emissioni attuali di anidride carbonica del settore di produzione di potenza, mentre l'altezza totale descrive le emissioni totali stimate in assenza di fonti carbon free. In blu idroelettrico, in giallo nucleare ed in arancione le altre rinnovabili. **Fonte: International energy agency, World energy Balance 2015**

Al fine di comprendere il ruolo che il nucleare può giocare all'interno della transizione energetica globale, occorre analizzare il contributo che esso ha fornito negli anni alla decarbonizzazione del

sistema energetico. Utilizzando un approccio conservativo⁴, è possibile valutare quanto la produzione di elettricità attraverso la fonte nucleare abbia evitato ulteriori emissioni di anidride carbonica **(Figura 5)**.

Il contributo del nucleare tra il 1970 ed il 2015 ha comportato l'abbattimento dell'eventuali emissioni di 68 Gt di anidride carbonica, valore quasi uguale al totale delle emissioni di tutto il settore di produzione tra il 2010 ed il 2015. Proprio per questa ragione, il contributo totale dell'energia nucleare nel parco energetico mondiale è caratterizzato da un incremento significativo anche negli scenari futuri più conservativi: sebbene il suo contributo relativo diminuirà a causa dell'utilizzo maggiore di rinnovabili e da un miglioramento delle efficienze tecnologiche, sia negli scenari SDS⁵ che in quelli STEP⁶ la produzione assoluta è in aumento.

L'effettivo contributo sarà determinato da diversi gruppi di fattori. Anzitutto, dipenderà dall'efficienze della industria nucleare stessa, dall'implementazione di programmi sulla gestione di vita dell'impianto, dalla riduzione dei costi operativi, dall'evoluzione tecnologica dei reattori, dalla competitività economica e dall'impatto di possibili incidenti sull'opinione pubblica. Secondariamente, dagli sviluppi del mix energetico in generale: quindi dalla diffusione di nuove tecnologie, dalle loro prestazioni economiche e dalla disponibilità geografica della risorsa [7].

1.2.3- Gli scenari socioeconomici ed energetici analizzati

Al fine di indagare il possibile contributo futuro del nucleare al processo di decarbonizzazione globale, è stato utilizzato il software *Java Climate Model* per processare quattro scenari differenti. Essi sono classificati in base al potenziale tecnologico futuro delle rinnovabili: *basso potenziale*, *medio potenziale*, *alto potenziale* e *irruzione tecnologica* (*approfondimenti nel CAPITOLO 6*).

È necessario precisare che l'obiettivo di questa dissertazione non consiste nell'avvaloramento del nucleare come mezzo sostitutivo delle rinnovabili, bensì di un'analisi circa l'adozione in parallelo di queste due fonti nella lotta al cambiamento climatico.

Utilizzando i database del World Population Prospect e Penn World Table, per quanto concerne gli input socioeconomici, e l'International Energy Agency, per gli input del settore energetico, è stato possibile valutare l'evoluzione del parco elettrico e delle relative emissioni di anidride carbonica in un'ottica di impegno politico per mitigare gli impatti del cambiamento climatico.

1.3-Come sta cambiando il mondo dell'energia?

1.3.1-L'evoluzione dell'approvvigionamento di energia primaria a livello globale

Tra il 1971 e il 2017, l'approvvigionamento totale mondiale di energia primaria (TPES) è aumentato di oltre 2,5 volte⁷. Il mix energetico globale ha subito delle grosse variazioni: le più evidenti hanno interessato le quote relative al petrolio e al gas naturale **(Figura 6)**.

Nonostante il petrolio fornisca ancora un contributo preponderante, il suo contributo è variato dal 44% al 32% del TPES tra il 1971 ed il 2017. Sebbene gli accaduti in Venezuela abbiano evidenziato, ancora una volta, la perturbabilità della sicurezza di approvvigionamento del petrolio greggio, sia la

⁴ Si ipotizza che la produzione rinnovabile e nucleare sia stata sostituita da un'altra fonte su considerazioni prettamente economiche, quindi che l'elettricità prodotto dalle fonti pulite sia stata principalmente prodotta da centrali termoelettriche a carbone.

⁵ Sustainable Development Scenarios dell'International Energy Agency.

⁶ Stated Policies Scenarios dell'International Energy Agency.

⁷ L'approvvigionamento totale di energia primaria è variato da 5519 Mtep a 13972 Mtep dal 1971 al 2017 (*dati IEA*).

domanda che la produzione sono aumentate negli ultimi due anni⁸. Seguendo la politica mondiale attuale, si assisterà ad un ulteriore aumento della domanda di circa 1,1 milioni di barili al giorno in media ogni anno sino al 2040 [8]. Le premesse attuale portano a prevedere un nuovo exploit del mercato petrolifero nei prossimi anni, come è possibile evincere dalle ultime variazioni di prezzo sul mercato⁹.

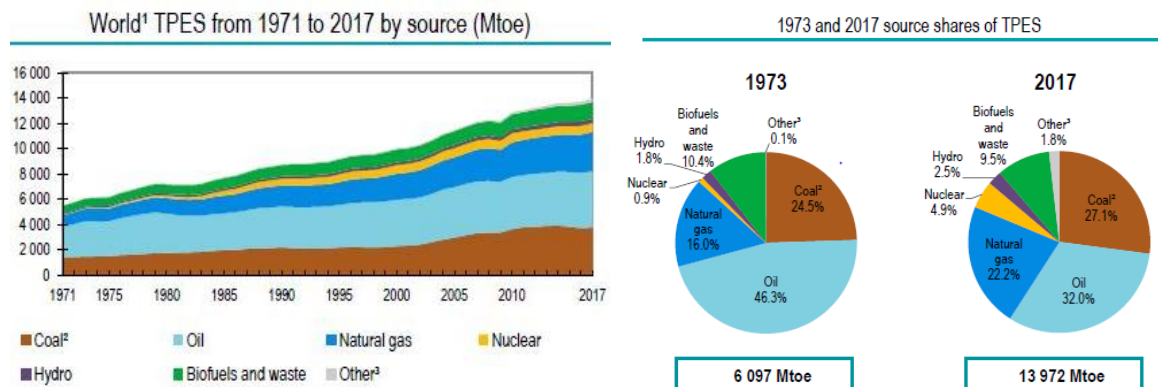


Figura 6: Approvvigionamento totale di energia primaria globale. (Sinistra) Evoluzione temporale dell'approvvigionamento totale di energia primaria globale in Mtep dal 1971 al 2017 per combustibile. (Destra) Contributo percentuale dei differenti combustibili nel TPES globale nel 1973 e nel 2017. **Fonte: International Energy Agency, Key World Energy Statistics 2019**

1 Nel TPES globale sono inclusi i bunkeraggi marini e l'aviazione internazionale.

2 In questi grafici la torba e gli scisti bituminosi sono aggregati al carbone.

3 In altre rinnovabili sono comprese le fonti geotermiche, solari, eoliche, maree/onde/oceano, calore e altre fonti.

Il commercio globale di gas naturale è in ascesa, sostenuto dalla rivoluzione dello scisto negli Stati Uniti e dall'aumento del business del gas naturale liquefatto. Spot trading, liquidità e flessibilità stanno aumentando nel mercato europeo ed internazionale, il che significa che il gas è più accessibile a una più ampia gamma di operatori del mercato ed è più sensibile ai cambiamenti a breve termine nell'offerta e nella domanda tra le regioni [9]. Nel 2018, la produzione globale di gas naturale ha raggiunto un nuovo picco di 3937 miliardi di metri cubi, un aumento del 4,0% rispetto al 2017. Questo andamento è stato osservato a partire dal periodo post-crisi finanziaria, con una produzione globale con un tasso di crescita annuo del 2,8% dal 2009. Tra il 1971 ed il 2017, si è registrato un aumento del contributo percentuale nel TPES globale dal 16% al 22%.

La quota di carbone ha mantenuto quasi lo stesso contributo percentuale, esso è aumentato di un solo punto percentuale nel 2017 rispetto al 1971, rispettivamente 27% e 26%. L'utilizzo del carbone ha subito una decrescita esponenziale dal 2015 al 2017, ma negli ultimi due anni ha subito un nuovo aumento repentino. Nel 2017 si è registrato un minimo negli investimenti in nuovi impianti a carbone: si è, difatti, verificata una diminuzione di due terzi degli investimenti registrati nel 2010 e, in Cina¹⁰, questo calo è stato particolarmente brusco. Tuttavia, occorre specificare che l'uso del carbone è stato soggetto a notevoli fluttuazioni nell'ultimo ventennio, influenzato principalmente dall'ampio

⁸ Nel 2018, la produzione mondiale di petrolio è provvisoriamente attestata a 98,3 mega-barili al giorno (Mb/g), valore più elevato della produzione media giornaliera del 2017 di 95,7 Mb/g. La produzione è aumentata nell'OECD (+9,0%, 105 Mt, 2.4 Mb/d) contrariamente a quanto successo all'OPEC (-0,2% del PIL, 7 Mt, -0.08 Mb/d). Per tutti gli altri paesi, la produzione è aumentata (1.0%, 15 Mt, 0.3 Mb/d) (dati: *Oil Information Overview, IEA*).

⁹ Il prezzo è salito sopra 80 dollari al barile nel 2018 per la prima volta dopo quattro anni ed il prezzo medio del Brent greggio è di \$ 73 al barile nel 2019 (dati: *U.S. EIA*).

¹⁰ La Cina produce 4485 TWh di energia elettrica attraverso l'utilizzo di carbone, è il maggior produttore e importatore di carbone a livello mondiale (dati *IEA*).

utilizzo di questa risorsa in Asia. Nel 2011 ha raggiunto il livello più alto¹¹, mentre nel 2017 si è arrestato al 27% del TPES mondiale.

Nel 2017, le fonti di energia rinnovabili hanno prodotto 1894 Mtep¹² di energia, ossia il 13,5% dell'approvvigionamento totale di energia primaria globale. A causa dell'uso diffuso nei paesi in via di sviluppo di fonti rinnovabili nel settore residenziale, i biocarburanti solidi ed il carbone di legna rappresentano circa il 60,7% dell'approvvigionamento di energia rinnovabile. Il contributo del nucleare è cresciuto dallo 0,5% al 4,9% [10].

1.3.2-Le rivoluzioni energetiche e la produzione di potenza mondiale

Due rivoluzioni stanno influenzando profondamente il quadro delle politiche energetiche globali: l'aumento della produzione di petrolio di scisto negli Stati Uniti e la trasformazione legata all'introduzione delle rinnovabili nel settore energetico globale.

La rivoluzione del petrolio di scisto ha portato un aumento della produzione di petrolio e gas negli Stati Uniti che è senza precedenti nella storia dell'industria degli idrocarburi¹³ (**Figura 7**), diminuendo i rischi per i paesi importatori connessi alla concentrazione di risorse convenzionali. Ma ha anche sollevato nuovi interrogativi sulle strategie che le principali economie dipendenti dagli idrocarburi adotteranno per affrontare le conseguenze di una maggiore incertezza sugli investimenti a lungo termine.

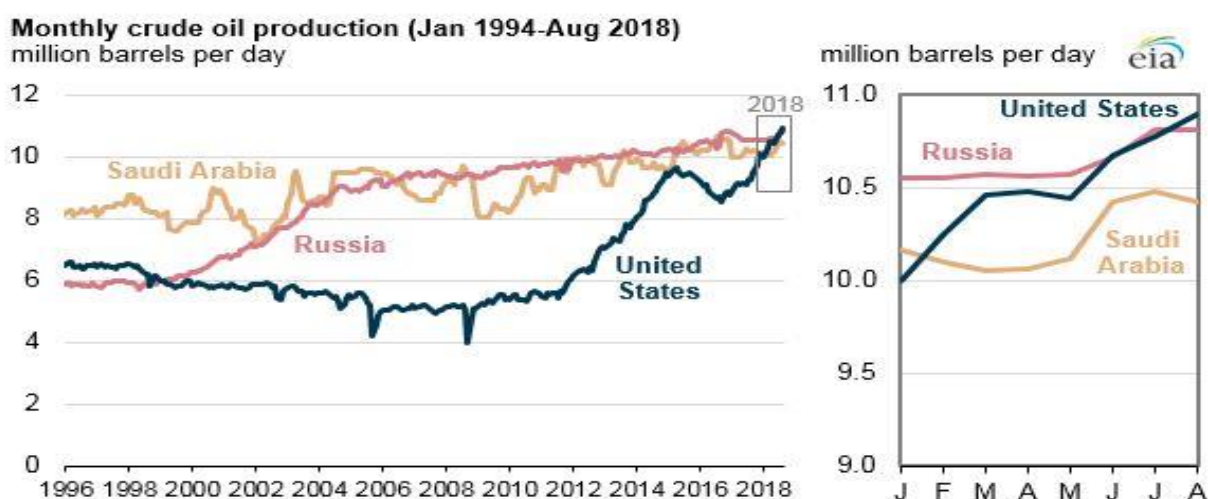


Figura 7: Produzione mensile di petrolio in milioni di barili al giorno. Nel mese di febbraio, la produzione di petrolio greggio U.S. ha superato quella dell'Arabia Saudita per la prima volta in più di due decenni. In giugno e agosto, gli Stati Uniti hanno superato la Russia nella produzione di petrolio greggio per la prima volta dal febbraio 1999. **Fonte: U.S. Energy Information Administration, Short-Term Energy outlook**

Gli impatti della rivoluzione delle energie rinnovabili e gli sconvolgimenti in corso nel settore dell'energia elettrica (**Figura 8**) stanno sollevando differenti preoccupazioni sulla necessità di una maggiore stabilità, di un ampliamento e di una maggiore interconnessione delle reti elettriche nazionali. Nonostante le fonti rinnovabili producano circa un quarto dell'elettricità globale, differenti

¹¹ Nel 2011, l'energia prodotta attraverso l'utilizzo di carbone ha raggiunto il massimo del 29% del TPES mondiale ed il 71% del TPES in Cina (dati IEA)

¹² Mega tonnellate equivalenti di petrolio, ossia $4,1868 \cdot 10^7$ Giga-Joule

¹³ L'America è il maggior produttore mondiale di petrolio con un'estrazione di quasi 11 milioni di barili al giorno (dati US EIA).

segnali dimostrano che si avrà un rallentamento dell'installazione di nuova capacità solare ed eolica nei prossimi anni [8].

La produzione di energia elettrica attraverso centrali a carbone è aumentata del 3% nel 2018 e, per la prima volta nella storia, ha superato i 10.000 TWh. Il carbone rimane saldamente la fonte energetica più utilizzata nel settore di produzione di potenza rappresentando il 38% della generazione elettrica globale [10]. La produzione di potenza da gas naturale è cresciuta lentamente fino a raggiungere il 15% nel 1990; da allora è cresciuta in maniera costante sino al 23,3% nel 2016, mentre è diminuita leggermente al 23,0% nel 2017. Nel 1973, poco prima della crisi petrolifera mondiale, il 25% della potenza prodotta proveniva dall'utilizzo di petrolio. Successivamente, l'utilizzo di questa fonte è stato in continuo declino sino a raggiungere il mero contributo del 3% nel 2017.

Le energie rinnovabili sono la seconda fonte più utilizzata a livello mondiale nella produzione di energia elettrica. Esse hanno fornito un contributo del 24,5% della generazione elettrica mondiale nel 2017. L'energia idroelettrica fornisce il 15,9% dell'elettricità mondiale, corrispondente al 65,1% del totale di energia elettrica rinnovabile; le fonti geotermica, solare, eolica e marina rappresentano il 6,5% della produzione mondiale di energia elettrica, pari al 26,6% del totale delle energie rinnovabili; infine i biocarburanti e rifiuti, compresi i biocarburanti solidi, svolgono un ruolo minore, fornendo solo il 2,0% dell'elettricità mondiale [11].

L'elettricità generata dal nucleare, la seconda fonte più grande di elettricità a basse emissioni di carbonio dopo l'energia idroelettrica, si è arrestata negli ultimi due decenni, con una quota di generazione in calo dal 17% nel 2000 al 10% nel 2017.

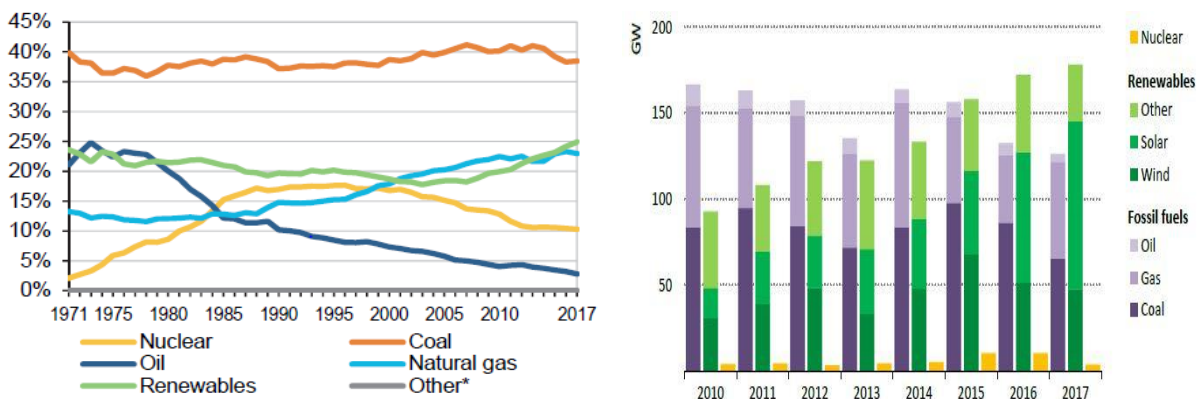


Figura 8: Mix energetico della produzione di potenza globale. (Sinistra) Evoluzione del contributo percentuale delle singole fonti energetiche nella produzione di potenza mondiale dal 1971 al 2017. Nuova installazione di capacità annuale 2010-2017. (Destra) Le capacità eolica e solare installate sono aumentate vertiginosamente negli ultimi anni e, a partire dal 2015, hanno soppiantato le nuove installazioni di impianti a combustibile fossile. Ciò ha comportato un maggiore interesse sull'utilizzo di accumuli energetici efficienti al fine di evitare una eccessiva destabilizzazione della rete elettrica. **Fonte:** (sinistra) International Energy Agency, Key world Energy Balance 2019; (destra) International Energy Agency, World Energy Outlook 2018

1.3.3-Il consumo finale globale: quali sono i settori più energivori?

Tra il 1973 ed il 2017, il consumo finale totale di energia (TFC) è aumentato di circa 2,3 volte¹⁴. È possibile notare che anche nei consumi finali il petrolio presenta la stessa evoluzione del TPES: il suo contributo è diminuito drasticamente cambiando dal 48,3% al 41,0% del consumo totale. Il gas naturale è aumentato di qualche punto percentuale passando dal 14,0% al 15,5%. La quota di carbone è, invece, diminuita di diversi punti percentuali nel 2017 rispetto al 1973, riducendosi dal

¹⁴ Il consumo finale di energia è aumentato passando da 4242 Mtep a 9717 Mtep (dati IEA)

13,6% al 10,5% del TFC globale. L'utilizzo finale di elettricità è raddoppiato e ha raggiunto la quota di 18,9% (Figura 8).

I settori industriale, residenziale e del trasporto costituiscono l'87% dei consumi finali. Sebbene questo dato sia di importanza rilevante, un'ulteriore analisi degli indici di emissione ed il contributo di ogni singola fonte è necessario al fine di individuare quale siano le strategie da adottare per assicurare lo svolgimento della transizione energetica globale. A causa delle molteplici differenze tra i paesi già sviluppati, i paesi in via di sviluppo e sottosviluppati, è essenziale effettuare una dissertazione specifica per ogni macroregione (*approfondimenti nel Capitolo 2*). Nonostante ciò, vi sono delle dinamiche comuni legate a ciascun settore che è possibile, già, rimarcare a livello globale [12].

I settori residenziale e edilizio combinati sono responsabili del 36% del consumo finale globale di energia e di quasi il 40% delle emissioni totali dirette e indirette di anidride carbonica. La domanda energetica degli edifici e delle costruzioni edilizie continua a crescere, grazie al miglioramento dell'accesso all'energia nei paesi in via di sviluppo, ad un maggior utilizzo e all'uso di dispositivi energivori per il raffreddamento e riscaldamento e alla rapida urbanizzazione globale¹⁵. Il riscaldamento è il più grande uso finale nel settore residenziale. Esso attesta attualmente il 36% del consumo energetico totale degli edifici, pari a 42 EJ¹⁶. Dal 2000, il miglioramento dell'efficienza energetica dei sistemi di riscaldamento ha evitato il consumo di 7 EJ.

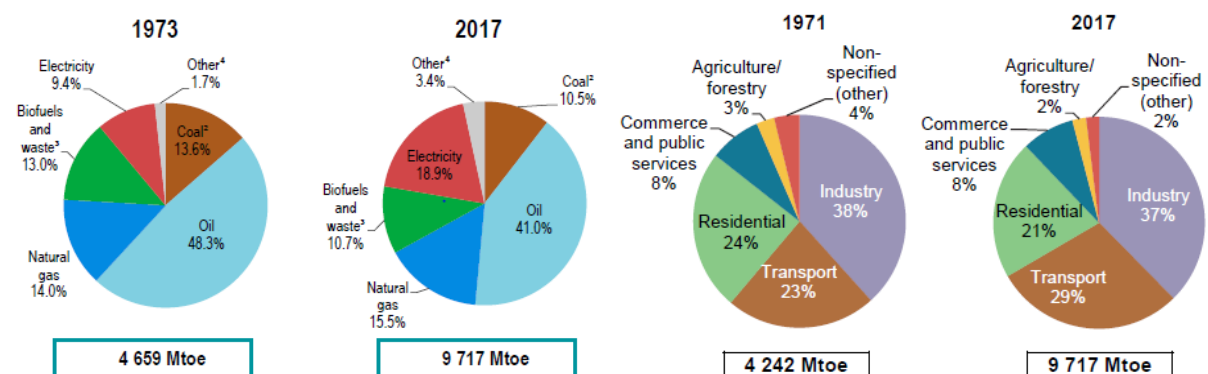


Figura 9: Consumo totale finale di energia globale. (Sinistra) Contributo percentuale dei differenti combustibili nel TFC globale nel 1973 e nel 2017. (Destra) Contributo percentuale dei differenti settori energetici nel TFC globale. FONTE: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, *KEY WORLD ENERGY BALANCES 2019*

- 1 Nel TPES globale sono inclusi i bunkeraggi marini e l'aviazione internazionale.
- 2 In questi grafici la torba e gli scisti bituminosi sono aggregati al carbone.
- 3 Per diversi paesi, la quota di biocombustibili è stata stimata
- 4 In altre rinnovabili sono comprese le fonti geotermiche, solari, eoliche, maree/onde/oceano, calore e altre fonti.

Il settore industriale può essere suddiviso in tre macro-gruppi: produzione ad alta intensità di energia, produzione non ad alta intensità energetica e non manifatturiera. L'energia è utilizzata in questo settore per un'ampia gamma di scopi, quali il processamento e l'assemblaggio di componenti, produzione di vapore e cogenerazione, processi di riscaldamento e raffreddamento, l'illuminazione, riscaldamento e condizionamento delle industrie stesse. Spesso il gas naturale ed il petrolio sono utilizzati per la produzione di prodotti chimici agricoli, la fabbricazione di prodotti chimici organici e materie plastiche. L'attenzione della comunità internazionale è rivolta a trovare soluzioni sostenibili nel settore produttivo ad alta intensità energetica che comprende l'industria alimentare, raffinerie petrolifere, industria metallurgica e siderurgica, cartiere e l'industria chimica.

¹⁵ La superficie di edifici aumenta con un tasso del 3% annualmente a livello globale (dati IEA)

¹⁶ 1 EJ = 10¹⁸J

Nel settore dei trasporti, il più grande settore di consumo con oltre un terzo del TFC complessivo, il consumo di petrolio rimane dominante¹⁷, nonostante la rapida crescita dei biocarburanti dopo il 2000. Nonostante le altre fonti siano in costante aumento, questa crescita non è abbastanza rapida da soddisfare l'aumento della domanda settoriale. Il settore dei trasporti rappresenta quasi un quarto delle emissioni complessive di gas a effetto serra ed è il principale responsabile della scarsa qualità dell'aria nelle città. Non si è registrata, infatti, la stessa riduzione progressiva delle emissioni rispetto ad altri settori [10].

¹⁷ Le stime del contributo del petrolio nel settore del trasporto per i paesi OECD sono del 93% dell'utilizzo energetico totale, seguono i biocombustibili, il gas naturale ed infine l'elettricità (*dati IEA*).

CAPITOLO 2- QUADRO ENERGETICO MONDIALE

2.0-Panoramica

L'obiettivo di questo capitolo è descrivere le principali caratteristiche dei mix energetici dei paesi OECD, non OECD, l'Africa ed il Medio-oriente, al fine di fornire una chiave di lettura sull'entità e le difficoltà che la comunità internazionale sarà costretta a fronteggiare in questo delicato processo di transizione. In particolare, saranno attenzionati gli aspetti correlati alle trasformazioni nella produzione, TPES, TFC e nel settore di produzione di potenza.

2.1- I paesi OECD

2.1.1-Total primary energy supply

Nel complesso, il TPES per le regioni OECD nel 2018 è stato pari a 5374 Mtep, il valore più alto dal 2010. Dopo un periodo di diminuzione netta all'inizio del decennio, è la prima volta che il TPES netto aumenta per due anni di fila, presentando rispettivamente un aumento relativo annuo di 0,6% nel 2017 e di 1,2% nel 2018. Dal punto di vista globale, la fornitura totale di energia dei paesi OECD rappresenta quasi i due quinti del totale.

I paesi maggiormente energivori¹⁸ hanno presentato degli andamenti molto differenti negli ultimi anni. Solo il TPES degli Stati Uniti è cresciuto oltre i 70 Mtep¹⁹ tra il 2017 ed il 2018: il gas naturale ha rappresentato più dei due terzi di tale crescita, per lo più guidato dalla produzione di energia elettrica ed il consumo residenziale; mentre la restante parte è stata costituita da petrolio ed energie rinnovabili. Anche in Canada si è registrato un aumento del 4%, che ha comportato il raggiungimento di un TPES complessivo di 300 Mtep, massimo storico di questa regione; allo stesso modo si è registrato un aumento per Messico, Corea, Australia e Polonia.

D'altra parte, diversi paesi hanno registrato una diminuzione del TPES: in Europa, la Germania (-4%) ha raggiunto il suo livello di consumo più basso dagli anni '70; Belgio (-5%), Portogallo (-4%), Grecia, Olanda e Svezia (-3%), Italia e Norvegia (-2%); anche Giappone, Francia, Turchia e Nuova Zelanda hanno mostrato una diminuzione del TPES complessivo.

2.1.2- Produzione

Dal punto di vista regionale, non ci sono stati grossi cambiamenti nella produzione di energia tra il 2016 ed il 2017. Ancora una volta i paesi OECD sono stati i maggiori produttori di energia a livello globale con 4811 Mtep nel 2017. Gli Stati Uniti rimangono il maggior produttore di gran lunga tra i paesi OECD, attestando una produzione di 1933 Mtep. Nel 2018, l'aumento di produzione media annua di petrolio e di gas ha comportato il raggiungimento dell'autosufficienza per questo paese. In Canada, il secondo produttore più grande tra i paesi OECD, si è registrato un aumento medio relativo del 6% e si è raggiunto il massimo storico di produzione di 510 Mtep. Anche in Australia, il terzo maggior produttore di questo gruppo di paesi, si è raggiunto un nuovo massimo storico di 400 Mtep.

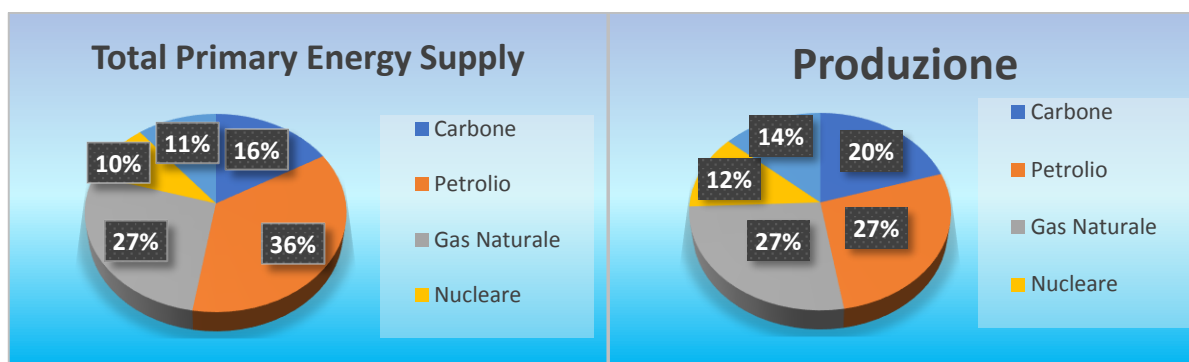


Figura 10: Approvvigionamento di energia primaria(sinistra). Produzione di energia (destra). Nei precedenti grafici, viene riportato il contributo relativo di ciascuna fonte nell'approvvigionamento e nella produzione di energia nei paesi OECD nel 2017. Il carbone include scisto bituminoso e torba; il petrolio comprende il petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi; le rinnovabili ed i rifiuti comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili; il gas naturale sia gas associati e non associati. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

¹⁸ I 10 paesi maggiormente energivori OECD sono USA, Canada, Giappone, Korea, Germania, Francia, Messico, UK, Italia e Turchia

¹⁹ L'aumento registrato negli USA rappresenta oltre l'1% del TPES totale dei paesi OECD

Nei paesi OECD europei²⁰, asiatici e oceanici²¹, la autosufficienza è attestata circa al 60%: mentre in Asia ed in Oceania si è registrato un miglioramento causato dalla maggiore produzione di gas naturale, in Europa sono diminuiti sia l'autosufficienza relativa al gas che al petrolio. La produzione di energia è aumentata in 24 dei 36 membri del gruppo OECD.

2.1.3-Total final consumption

Il consumo finale è continuato a crescere negli ultimi anni ed ha raggiunto un nuovo massimo, riferito al periodo di post-crisi economica, di 3711 Mtep. Questo aumento è stato particolarmente pronunciato in Europa (+1,8%) e nei paesi OECD dell'Asia-Oceania (+1,6%).

Nonostante questa crescita abbia interessato tutte le fonti energetiche in termini assoluti, occorre rimarcare che circa l'80% è stato costituito dall'utilizzo di gas e petrolio. Nei paesi OECD americani²², la fonte predominante è stata il gas naturale in linea con il corrispettivo aumento di approvvigionamento; mentre in Europa si è registrato un aumento uniforme che ha interessato tutte le fonti.

Dal punto di vista settoriale, la situazione è rimasta pressoché invariata: industria, trasporti e usi non energetici rappresentano ancora circa un terzo dei consumi finali. Il settore dei trasporti ha raggiunto il nuovo massimo storico di consumo finale pari a 1251 Mtep, abbattendo il record ottenuto prima della crisi economica e riconfermandosi il settore più energivoro. L'utilizzo di petrolio rappresenta ancora la fonte energetica dominante (93%); la rapida crescita dell'utilizzo di biocombustibili non è riuscita a compensare l'aumento della domanda in questo settore.

I consumi nel settore residenziale e dei servizi sono rimasti perlopiù costanti con piccole variazioni per i singoli paesi OECD. I consumi dell'industria continuano a fluttuare a causa dei differenti driver economici dei singoli paesi post-crisi economica.

2.1.4-La produzione elettrica

La produzione di potenza, attestata a circa 11000 TWh, è stata responsabile di circa la metà dell'aumento dell'approvvigionamento di gas naturale nei paesi OECD. Nel 2018, il gas ha sostituito il carbone come combustibile più usato nella produzione di potenza con più di 3000 TWh generati.

Dopo una crescita media annuale del 5% dal 2010, la generazione da fonti rinnovabili ha raggiunto per la prima volta lo stesso contributo del carbone nel 2018, pari circa a 2900 TWh, il cui utilizzo è decresciuto consistentemente in gran parte dei paesi OECD.

La produzione di potenza da impianti a petrolio è continuata a diminuire ed ha raggiunto i 200 TWh. Per quanto concerne il nucleare, la produzione di potenza da questa fonte è rimasta pressoché costante, fluttuando attorno ad un valore di 1900 TWh.

Si è registrato un aumento del 3% per i paesi OECD americani; mentre la produzione totale di potenza è rimasta stabile in Europa, Asia e Oceania. In particolare, questo aumento ha interessato la generazione da gas naturale (+12%) che ha comportato un aumento della penetrazione dei combustibili fossili nella produzione di potenza [10] [6] [13].

²⁰ Austria, Belgio, Repubblica Ceca, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Ungheria, Islanda, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Olanda, Norvegia, Polonia, Portogallo, Repubblica Slovacca, Slovenia, Spagna, Svezia, Svizzera, Turchia, Regno Unito.

²¹ Israele, Giappone, Korea, Australia e Nuova Zelanda.

²² Canada, Cile, Messico e Stati Uniti.

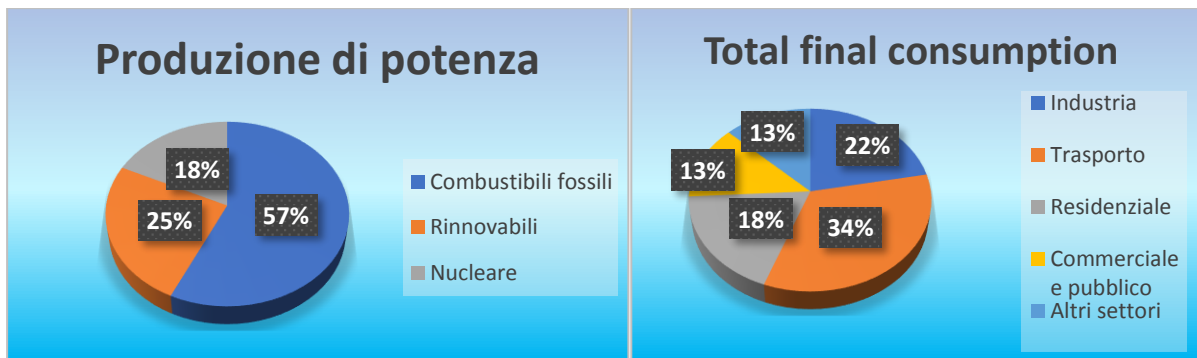


Figura 11: Produzione di potenza (sinistra). Uso finale dell'energia (destra). I grafici mostrano il contributo relativo di ciascuna fonte nella produzione di potenza e negli usi finali per i paesi OECD nel 2017. I combustibili fossili includono carbone, scisto bituminoso, torba, petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi, le rinnovabili comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili e rifiuti rinnovabili. Altri settori include pesca, agricoltura ecc. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

2.2- Africa

2.2.1-Total primary energy supply

L'approvvigionamento di energia primaria in Africa ha raggiunto gli 810 Mtep nel 2017. Nonostante differenti paesi africani siano ancora fortemente dipendenti dalle importazioni di combustibili fossili, il continente, nella sua totalità, risulta essere autosufficiente ed esportatore netto di carbone, gas naturale e petrolio greggio. La produzione di biocombustibili ha contribuito al 45% del TPES complessivo, valore relativo molto più elevato della media mondiale del 9,5%. Le condizioni geofisiche, l'arretratezza del settore agricolo e industriale e, di conseguenza, il basso PIL pro capite comportano, ancora oggi, un uso diffuso dei biocombustibili solidi per la cottura dei cibi. Il contributo di gas naturale è aumentato e corrisponde circa al 15% del TPES attuale, mentre il petrolio fornisce ancora un contributo preponderante pari al 22,5%. A causa della maggiore elettrificazione e ai recenti sviluppi della produzione di potenza da gas naturale, la penetrazione del carbone è diminuita e si è attestata al 14%.

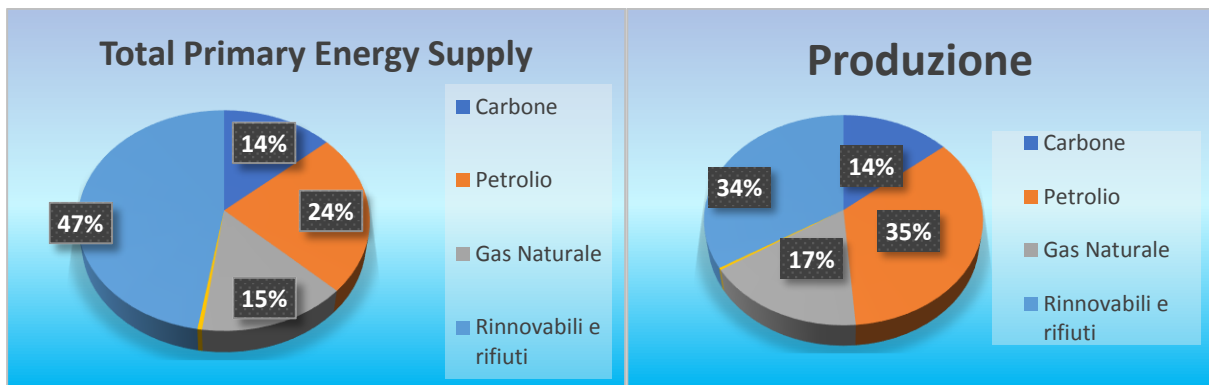


Figura 12: Produzione di potenza (sinistra). Uso finale dell'energia (destra). I grafici mostrano il contributo relativo di ciascuna fonte nella produzione di potenza e negli usi finali per l'Africa nel 2017. I combustibili fossili includono carbone, scisto bituminoso, torba, petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi, le rinnovabili comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili e rifiuti rinnovabili. Altri settori include pesca, agricoltura ecc. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

2.2.2- Produzione

Sebbene il contributo relativo africano nella produzione mondiale sia rimasto pressoché costante negli ultimi 50 anni²³, la produzione assoluta è quasi triplicata. La produzione di energia africana è dominata dal petrolio (35%), bio-combustibili solidi e rifiuti (32%), gas naturale (17%) e carbone (14%) (**Figura 12**). In Africa vengono prodotti il 9% del petrolio ed il 6% del gas naturale a livello

²³ Il contributo relativo alla produzione globale è variato dal 7,8% nel 1971 al 8,1% nel 2017.

globale. In particolare, la produzione di gas naturale è stata caratterizzata da un aumento medio relativo annuale del 4,8% nel 2018, raggiungendo i 237 miliardi di metri cubi; mentre la produzione di petrolio è stata segnata da un aumento medio annuale dello 0,7%, raggiungendo gli 8,2 milioni di barili al giorno.

La produzione di combustibile fossile non è distribuita uniformemente all'interno del continente. Il nord Africa²⁴ è il principale produttore di petrolio con circa 150 Mtep di produzione grazie al contributo di Algeria, Egitto e Libia; sebbene, a livello nazionale, il maggior produttore sia la Nigeria che rappresenta il 24% (95 Mtep) della produzione complessiva. A livello continentale, l'Algeria ha prodotto il 42% del gas naturale ed il 18% del petrolio, l'Egitto il 22% del gas naturale e l'8% del petrolio greggio, la Libia il 12% del petrolio ed il 3,2% del gas naturale. La macroregione sud africana²⁵ è caratterizzata da un'elevata produzione di carbone e di petrolio greggio: il Sud Africa, quarta esportatrice di carbone a livello globale, ha prodotto il 92,5% del carbone africano; mentre l'Angola è il secondo produttore più grande di petrolio greggio a livello nazionale, rappresentando circa il 20% della produzione continentale. La produzione di energia in Africa orientale²⁶ e centrale²⁷ è dominata dai biocombustibili solidi. L'Africa occidentale²⁸ è la maggiore produttrice di energia in Africa, fornendo circa 300 Mtep della produzione continentale.

2.2.3-Total final consumption

Nel 2018, il consumo finale totale è aumentato del 2,9% riferito al valore medio annuale degli ultimi 10 anni e si è attestato pari a 529 Mtep. Questa crescita è stata molto marcata tra tutti i combustibili principali del mix africano: il gas naturale ha subito un aumento relativo annuale del 6,6%, il carbone del 3,9%, mentre per il petrolio si è registrato una diminuzione dello 0,4%. Nonostante ciò, il petrolio rappresenta ancora il combustibile più usato, rappresentando il 41% del TFC africano; mentre il gas naturale contribuisce al 28% dell'uso finale complessivo. Infine, la penetrazione delle rinnovabili è aumentata notevolmente negli ultimi dieci anni, rappresentando l'1,8 % dei consumi finali.

2.2.4-La produzione elettrica

Nel 2017, la produzione di potenza si è attestata ad un valore circa nove volte più elevato ai livelli del 1971, registrando grosse variazioni nel mix energetico utilizzato. Basti pensare che la produzione di potenza da gas naturale era quasi nulla nel 1971, mentre nel 2017 ha rappresentato il 40% della produzione continentale²⁹, fornendo circa 325 TWh di elettricità; mentre il carbone ha contribuito al 31% della produzione elettrica africana, fornendo 254 TWh. La penetrazione dell'idroelettrico è incrementata del 6,6%, aumento medio relativo alla crescita media annuale degli ultimi 10 anni, fornendo circa 123 Twh che rappresentano il 26 % della produzione di potenza continentale.

Il Sud Africa è l'unico paese in Africa con un impianto nucleare di potenza commerciale: due reattori PWR collocati nella centrale di Koeberg, ciascuno dalla potenza di 970 MW, hanno prodotto circa 15 TWh di elettricità. Il prossimo paese ad avere accesso al nucleare sarà l'Egitto che ha firmato un

²⁴ In letteratura, il nord Africa è costituito da Algeria, Libia, Egitto, Marocco e Tunisia.

²⁵ In letteratura, con sud Africa ci si riferisce ad Angola, Botswana, Namibia, Sud Africa, Zambia e Zimbabwe.

²⁶ In letteratura, l'Africa orientale è costituita da Eritrea, Etiopia, Kenya, Mauritius, Mozambico, Sud Sudan, Sudan e la repubblica unita di Tanzania.

²⁷ In letteratura, l'Africa centrale è costituita da Cameroon, Congo e la repubblica democratica del Congo.

²⁸ In letteratura, l'Africa occidentale è costituita da Benin, Costa d'Avorio, Gabon, Ghana, Niger, Nigeria, Senegal e Togo.

contratto con la compagnia russa Rosatom per la costruzione di quattro reattori VVER-1200 ad El Dabaa.

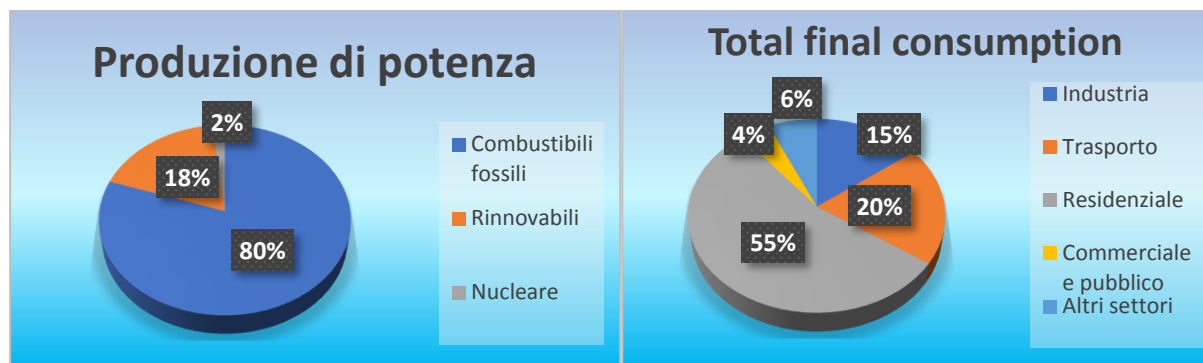


Figura 13: Produzione di potenza (sinistra). Uso finale dell'energia (destra). I grafici mostrano il contributo relativo di ciascuna fonte nella produzione di potenza e negli usi finali per l'Africa nel 2017. I combustibili fossili includono carbone, scisto bituminoso, torba, petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi, le rinnovabili comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili e rifiuti rinnovabili. Altri settori include pesca, agricoltura ecc. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

La produzione di potenza riflette la disuniformità del mix energetico nelle macroregioni africane. Il nord Africa ed il Sud Africa hanno generato circa il 74% dell'elettricità, nonostante solo il 20% della popolazione continentale viva in questa porzione territoriale. L'accesso all'elettricità rappresenta ancora una problematica centrale dei paesi sub-sahariani e non solo: si attesta un tasso di incremento del 50,6% a livello continentale, del 22,3% nella zona rurale sub-sahariana, 1,5% in Burkina Faso, 0,7% nel Chad, 1,0% nella Repubblica Centrafricana e in Djibouti, 0,4% nella repubblica democratica del Congo ed in Niger e dello 0,2% in Sud Sudan [10] [6] [13].

2.3- I paesi non OECD

2.3.1-Total primary energy supply

Nel 2017, l'approvvigionamento totale di energia primaria dei paesi non-OECD americani³⁰ (612 Mtep) non ha presentato grosse variazioni rispetto al 2016: il petrolio fornisce un contributo preponderante del 40% del TPES complessivo, seguito dal gas naturale al 23% e dai biocombustibili e scarti al 21%. Le rinnovabili rappresentano il 31% del TPES complessivo, valore molto più elevato della media globale del 14%. Il carbone ha fornito solo il 4% dell'approvvigionamento complessivo, il contributo relativo è diminuito rispetto al 2016 a causa dell'aumento relativo del 24% di esportazione del carbone colombiano.

Nello stesso anno, l'approvvigionamento totale dei paesi non-OECD asiatici³¹ (4954 Mtep) è continuato ad aumentare con un tasso maggiore rispetto agli anni passati: +3,3% nel 2017, +0,7% nel 2016, +1,2% nel 2015. In particolare, il TPES dei paesi asiatici non-OECD ha rappresentato il 35,5% del TPES globale. La produzione a livello continentale è minore rispetto alla domanda, di conseguenza vi è un flusso netto entrante di fonti energetiche. Cina e India non sono energeticamente indipendenti: è stato registrato un livello di autosufficienza rispettivamente dell'80% e del 63%. Il contributo dei biocombustibili è diminuito considerevolmente negli ultimi dieci anni e si è attestato al 10%

³⁰ I paesi non-OECD americani sono Argentina, Bolivia, Brasile, Colombia, Costa Rica, Cuba, Curaçao¹, la repubblica Dominicana, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Haiti, Honduras, Jamaica, Nicaragua, Panama, Paraguay, Perù, Suriname, Trinidad and Tobago, Uruguay, Venezuela, Anguilla, Antigua and Barbuda, Aruba, le Bahamas, Barbados, Belize, Bermuda, Bonaire, le isole vergini britanniche, le isole Cayman, Dominica, Malvinas; la Guyana francese; Grenada; Guadalupe, Guyana, Martinique, Montserrat, Porto Rico e Saba, Saint Eustatius, Saint Kitts e Nevis, Saint Lucia, Saint Pierre and Miquelon, Saint Vincent e Grenadines, Sint Maarten, Turks e Caicos.

³¹ I paesi non-OECD asiatici sono Cina, Bangladesh, Brunei Darussalam, Cambogia, India, Indonesia, la Repubblica coreana, Malaysia, Mongolia, Myanmar, Nepal, Pakistan, le Filippine, Singapore, Sri Lanka, Taipei, Tailandia, Vietnam, Afghanistan, Bhutan, le isole Cook, Fiji, Polinesia francese, Kiribati, Laos, Macau, le Maldive, Nuova Caledonia, Palau, Papua Nuova Guinea, Samoa, le isole Solomon, Timor-Leste, Tonga, Vanuatu

dell'approvvigionamento totale; mentre il contributo relativo del petrolio è rimasto pressoché costante e pari circa ad un quarto del complessivo. Il gas naturale ha raggiunto il 9% da un contributo quasi nullo cinquanta anni fa; mentre il carbone fornisce ancora un contributo preponderante, costituendo più della metà del TPES totale, valore nettamente maggiore della media globale del 27%.

Nel 2017, l'approvvigionamento di energia primaria nei paesi non-OECD europei ed euroasiatici³² è aumentato di 23 Mtep, che corrispondono ad un incremento relativo annuo rispetto al 2016 del 2,1%, e si è attestato pari a 1120 Mtep. Nonostante il tasso di aumento più significativo abbia interessato la regione Mediterranea³³, caratterizzata da un incremento relativo annuo del 5,8% dell'approvvigionamento; questa regione ha rappresentato meno dell'1% della domanda di energia totale dei paesi non-OECD in Europa ed Eurasia. L'Europa Orientale³⁴ ha ridotto il proprio approvvigionamento del 21,1% rispetto al valore medio valutato tra 2010-2017, principalmente correlato alla riduzione del TPES in Ucraina, il secondo paese più energivoro di questa macroregione, e alla corrispondente riduzione dei TFC; mentre la regione del Caucaso³⁵ ha incrementato il proprio TPES del 30% rispetto allo stesso periodo. La Repubblica federale russa, il paese più energivoro tra i paesi analizzati in questo paragrafo, ha aumentato l'approvvigionamento di energia primaria del 2,5%, corrispondenti a 18 Mtep di energia; analogamente a quanto successo in Kazakhstan, terzo paese più energivoro della regione, caratterizzato da un incremento relativo annuo del 4,1%.

2.3.2- Produzione

Nel 2017, tra i paesi americani non-OECD, i maggiori produttori di energia, elencati in ordine decrescente, sono stati Brasile, Venezuela, Colombia, Argentina, Trinidad e Tobago ed Ecuador. Questi paesi hanno contribuito alla produzione dell'89% dell'energia totale prodotta, pari a 792 Mtep, di questa macroregione. La produzione di energia è assai disuniforme: basti pensare che il solo Brasile ha contribuito al 37% della produzione totale. La produzione complessiva è diminuita rispetto ai valori del 2016, principalmente a causa dell'instabilità geopolitica ed economica del Venezuela (-11,5%), Colombia (-0,7%), Argentina (-2,0%) e Trinidad e Tobago (-0,2%). La produzione di carbone in Colombia, che rappresenta il 96 % del carbone totale prodotto in questa macroregione, è rimasto pressoché costante e si è attestata a 59 Mtep. In Venezuela, la produzione di petrolio è continuata a diminuire ed ha raggiunto i 123 Mtep, corrispondente ad una diminuzione relativa annua del 12%. Questa diminuzione è stata parzialmente compensata dall'incremento relativo nella produzione del petrolio brasiliano del 4,3%. La produzione di gas naturale è rimasta, invece, stabile: i due più grandi produttori di gas, Argentina e Trinidad e Tobago, hanno registrato una diminuzione relativa annua quasi nulla, rispettivamente pari a 0,3% e 0,4%. Inoltre, l'aumento relativo della produzione di gas naturale brasiliano ha compensato le ingenti perdite di produzione in Venezuela (-1,9%) ed in Perù (-11%). Nonostante la produzione idroelettrica sia diminuita nei due paesi maggiormente produttori, vale a dire Brasile (-2,6%) e Paraguay (-6,4%); la produzione totale è aumentata del 2,6%, principalmente a causa dell'aumento di produzione in Colombia (+25,1%) e Argentina (+6,8%). La produzione delle fonti rinnovabili è aumentata relativamente dell'11,3%, guidata dall'incremento del 24% in Brasile.

I paesi non-OECD asiatici sono i secondi produttori di energia nel mondo: producendo circa 3971 Mtep di energia, hanno contribuito al 28% della produzione globale nel 2017. La Cina ha fornito il 61,7% dell'energia totalmente prodotta in questa regione, mentre India ed Indonesia hanno fornito

³² I paesi europei ed euroasiatici sono Albania, Armenia, Azerbaijan, Bielorussia, Bosnia ed Erzegovina, Bulgaria, Croazia, Cipro, Macedonia, Georgia, Gibilterra, Kazakhstan, Kosovo, Kirgizstan, Lituania (dati riferiti al 2017, periodo in cui il paese non era ufficialmente membro OECD), Malta, Moldavia, Montenegro, Romania, Serbia, Repubblica federale russa, Tajikistan, Turkmenistan, Ucraina, Uzbekistan

³³ Cipro, Gibilterra e Malta

³⁴ Bielorussia, Moldavia e Ucraina

³⁵ Armenia, Azerbaijan e Georgia

rispettivamente il 14% e l'11,3% del totale. Il mix di produzione è strettamente dipendente dal carbone, che costituisce circa il 60% della produzione totale; mentre petrolio e gas contribuiscono rispettivamente al 9% e al 10%. Le rinnovabili ed i rifiuti, inclusi sia i rifiuti industriali e municipali che i biocombustibili, rappresentano il 19% della produzione. Infine, il nucleare ha fornito un contributo del 2% alla produzione complessiva.

Nel 2017, la produzione di energia totale nei paesi non-OECD europei ed euro-asiatici è aumentata del 3,6%, corrispondenti a 66 Mtep, registrando un tasso di incremento maggiore dei paesi OECD. Questo aumento è stato prevalentemente dovuto alla crescita della produzione nella repubblica federale russa, che rappresenta ben il 74% della produzione totale di questi paesi, e del Kazakistan. In Russia, è aumentata sia la produzione di carbone che di gas rispettivamente di 13Mtep e 43 Mtep rispetto all'anno precedente; mentre la produzione di petrolio è decresciuta di 1 Mtep. I dati provvisori del 2018 affermano che la Russia sia stata la seconda produttrice mondiale e la prima esportatrice di gas³⁶, la terza maggior produttrice di petrolio³⁷ e la sesta più grande produttrice e terza esportatrice di carbone³⁸. Nonostante a livello regionale, il tasso di autosufficienza ha marcato un nuovo record, attestandosi ad un valore di 171%; vi sono alcuni tra i paesi maggiormente dipendenti dalle importazioni: Malta, Cipro e la Bielorussia.

2.3.3-Total final consumption

Nel 2017, nei paesi non-OECD americani, il settore industriale è rimasto il settore più energivoro, rappresentando il 38% dei consumi finali, seguito dal settore dei trasporti al 35% e dal settore residenziale al 16%. Tutti i settori economici sono stati interessati da un incremento, pressoché, stazionario negli ultimi cinquanta anni, ad eccezione del settore dei trasporti in cui il consumo finale è quasi quadruplicato. Nonostante il petrolio rappresenti ancora il contributo maggiore nei TFC, rappresentando il 47% dei consumi finali totale di questa regione, ha subito una diminuzione del contributo relativo negli ultimi anni, principalmente a causa della maggiore penetrazione del gas naturale e dall'ingente elettrificazione in corso, che ha raggiunto un contributo relativo del 18%.

Il consumo finale totale nei paesi non-OECD asiatici è aumentato più di cinque volte negli ultimi cinquant'anni ed ha subito trasformazioni rilevanti. Il contributo relativo dei biocombustibili è diminuito di un terzo, rappresentando solo il 12% del contributo percentuale nel 2017. Nello stesso anno, si è registrato una penetrazione del petrolio del 30,5 %, principalmente correlato all'aumento della domanda nel settore dei trasporti, ed un contributo relativo del carbone del 25%. Il contributo relativo dell'elettricità è aumentato vertiginosamente negli ultimi cinquant'anni, variando da un contributo del 3,2% nel 1971 al 21% nel 2017. L'industria, il settore maggiormente energivoro di questa regione, rappresenta il 50 % dei consumi finali e rimane prevalentemente dipendente dall'utilizzo di carbone. Il settore residenziale si è confermato il secondo settore maggiormente energivoro, rappresentando il 43 % del TFC totale.

Nel 2017, nei paesi non-OECD europei ed euroasiatici, il gas naturale ha fornito il contributo relativo maggiore (32%), seguito dal petrolio (26%), calore (18%), elettricità (15%) e carbone (7%). Il TFC ha subito un incremento annuale del 3,5%, principalmente condotto dall'aumento del consumo relativo nel settore residenziale (6,4%). Il settore dei trasporti ha raggiunto il massimo storico degli ultimi trent'anni di 93 Mtep.

³⁶ Sono stati prodotti 715 miliardi di metri cubi ed esportati 236 miliardi di metri cubi di gas naturale.

³⁷ Sono stati prodotti 554 mega-tonnellate di petrolio

³⁸ Sono stati prodotti 420 mega-tonnellate e esportate 182 mega-tonnellate di petrolio

2.3.4-La produzione elettrica

La produzione di potenza da fonti rinnovabili ha costituito, nel 2017, il 76% della produzione totale di circa 1210 TWh. In particolare, l'idroelettrico ha contribuito il 57% della produzione di potenza dei paesi non-OECD americani, contributo relativo molto più elevato del contributo medio globale attestato al 14%. Il nucleare, presente solo in Brasile e Argentina, ha contribuito alla produzione di circa 22 TWh. Rispetto all'anno precedente è stata registrata una diminuzione di produzione elettrica da nucleare del 25% a causa dell'utilizzo a potenza parziale in Argentina. I combustibili fossili, invece, hanno contribuito al 31% della produzione di potenza totale.

Nei paesi non-OECD asiatici, la produzione di potenza è ancora strettamente dipendente dall'utilizzo della fonte carboniosa. Essa rappresenta il 63,6% del mix elettrico regionale, valore quasi doppio della media globale pari a 38,5%. Gli impianti a carbone hanno prodotto il 74% dell'elettricità in India, il 68% in Cina, il 58% in Indonesia e l'89% in Mongolia. Inoltre, si è registrato un aumento relativo annuo della produzione di elettricità del 5,9%, guidato dall'incremento del 6,7% in Cina e del 5,1% in India³⁹. Per quanto concerne l'utilizzo delle rinnovabili, si registra un aumento di tutte le fonti principali: geotermica, fotovoltaica, eolica e solare; mentre una diminuzione della penetrazione relativa dei biocombustibili.

Nei paesi non-OECD europei ed euro-asiatici, il settore di produzione di potenza è principalmente dominato dal gas naturale (40%), seguito dal carbone (22%) e nucleare (18%). I paesi non-OECD sono i secondi produttori di elettricità da nucleare a livello mondiale. La Russia, l'Ucraina, la Bulgaria, la Romania e l'Armenia hanno prodotto 318 TWh di elettricità, rappresentando un contributo del 12,3% all'energia elettrica prodotta da nucleare. Le rinnovabili hanno rappresentato il 19% del mix elettrico nel 2017. Nonostante si sia registrato un aumento della penetrazione annuale dell'eolico e del solare del 12,3%, essi rappresentano ancora solo l'1% dell'output elettrico di questa regione; il contributo principale è attualmente proveniente dalla fonte idroelettrica [10] [6] [13].

2.4- Medio Oriente

2.4.1-Total primary energy supply

L'approvvigionamento di energia primaria è aumentato dell'1,9% nel 2017 rispetto al 2016 ed ha raggiunto i 750 Mtep. Esso è prevalentemente basato sul petrolio (43%) e gas naturale (55,8%); mentre il carbone rappresenta lo 0,5% e tutte le altre fonti energetiche solo lo 0,7%. Analogamente a quanto registrato nell'intero continente, è avvenuta una inversione di tendenza concernente la sostituzione del petrolio con l'utilizzo di gas naturale.

2.4.2- Produzione

Il Medio Oriente è la regione che presenta il livello di autosufficienza maggiore: la produzione di energia, pari a 2032 Mtep, è stata circa 2,8 volte maggiore della domanda nel 2017. La regione ha, difatti, prodotto il 14,5% dell'energia globale, contribuendo alla produzione del 33,5% del petrolio e il 16,6% del gas a livello mondiale.

L'Arabia Saudita è ancora la regione maggiormente produttrice di petrolio con 569 Mtep (38%), seguito da Iran (16%) e Iraq (15%). È interessante specificare che l'incremento annuale relativo maggiore, pari all'8,2%, è stato registrato, però, in Iran, che ha prodotto complessivamente 235 Mtep di petrolio; seguito dall'Iraq (+1,9%), che ha raggiunto la produzione totale storica di 231 Mtep. La produzione di petrolio è diminuita, invece, con un tasso annuale del 7,4% in Kuwait, 4,6% in Arabia Saudita, 4,3% negli Emirati Arabi, 3,4% in Qatar, 2,8% Bahrain e 3,5% in Oman. Come è possibile

³⁹ Corrispondenti rispettivamente a 6600 e 1500 TWh.

evincere facilmente da queste statistiche, la produzione complessiva di petrolio di questa regione è stata caratterizzata da una diminuzione del 2,0%. La produzione di gas naturale è aumentata di trenta volte negli ultimi cinquant'anni ed ha raggiunto, nel 2017, i 526 Mtep. L'Iran è il maggior produttore di gas naturale e contribuisce al 35% del gas prodotto in Medio Oriente, corrispondente a circa 182 Mtep. Il Qatar, caratterizzato da un incremento annuale di produzione del 7,9 % di gas naturale, ha contribuito al 28 %del gas complessivo prodotto, ossia 150 Mtep.

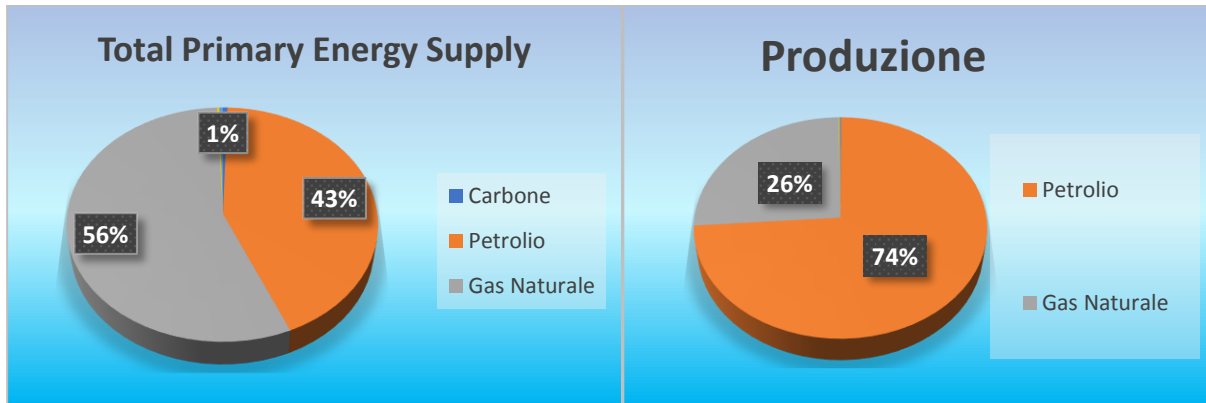


Figura 14: Produzione di potenza (sinistra). Uso finale dell'energia (destra). I grafici mostrano il contributo relativo di ciascuna fonte nella produzione di potenza e negli usi finali per il Medio Oriente nel 2017. I combustibili fossili includono carbone, scisto bituminoso, torba, petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi, le rinnovabili comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili e rifiuti rinnovabili. Altri settori include pesca, agricoltura ecc. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

2.4.3-Total final consumption

Il consumo finale totale è incrementato in maniera significativa negli ultimi cinquant'anni, aumentando di circa venti volte sia nel settore industriale che in quello dei trasporti. Si nota una dipendenza settoriale elevata dal petrolio nel settore dei trasporti (95%), industriale (25%) e residenziale (15%); il petrolio rappresenta, infatti, il 48% del TFC totale di questa regione. L'utilizzo del gas naturale è preponderante nel settore industriale (63%) e nel settore residenziale (46%). Lo share dell'elettricità nei consumi finali si attesta intorno al 15,5% del totale.

2.4.4-La produzione elettrica

Il contributo del petrolio nella produzione di potenza è diminuito, passando dal 54% nel 1971 al 26% nel 2017; mentre lo share del gas naturale è aumentato dal 27% al 72%. Basti pensare che gli impianti a gas naturale compensano l'intera domanda elettrica in Bahrain e Qatar, il 95% della domanda in Oman e negli Emirati, l'80% in Iran e Giordania [10] [6] [13].

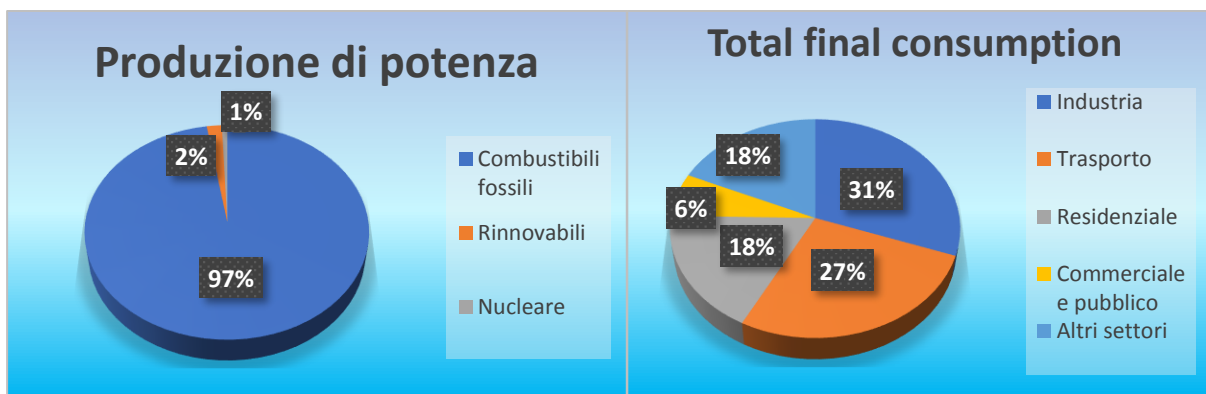


Figura 15: Produzione di potenza (sinistra). Uso finale dell'energia (destra). I grafici mostrano il contributo relativo di ciascuna fonte nella produzione di potenza e negli usi finali per l'Africa nel 2017. I combustibili fossili includono carbone, scisto bituminoso, torba, petrolio greggio, il gas naturale liquefatto, prodotti base di raffineria ed altri idrocarburi, le rinnovabili comprendono solare, geotermico, eolico, marino e idroelettrico, biocombustibili e rifiuti rinnovabili. Altri settori include pesca, agricoltura ecc. **Fonte: Database IEA Headline Energy Data**

CAPITOLO 3- IL SISTEMA CLIMATICO

3.0-Panoramica

Questo capitolo permetterà al lettore di familiarizzare con la struttura e la fisica di base del sistema climatico. Innanzitutto, si introducono i componenti di base e se ne analizzano le caratteristiche e le proprietà fondamentali. Dopodiché, si effettua un bilancio globale energetico tra flussi in ingresso e in uscita dallo spazio. Infine, si descrive il concetto di risposta climatica alle perturbazioni, parametrizzate attraverso l'utilizzo del concetto di forzante radiativo medio, e si introducono i principali driver climatici.

3.1-Le componenti del sistema climatico

3.1.1-L'atmosfera

I maggiori costituenti in volume dell'atmosfera terrestre sono azoto inerte (78,08%), ossigeno (20,95%) e argon (0,93%). Il vapore acqueo costituisce circa lo 0,25% della massa atmosferica e presenta una concentrazione che varia da 10 ppm in volume ai poli al 5% in volume nei luoghi più caldi e umidi della terra. I restanti gas sono definiti gas traccia, ossia anidride carbonica, metano, protossido di azoto e ozono, aerosol di origine naturale e antropogenica, polveri minerali, composti organici, acido solfidrico e acido solforico.

L'atmosfera è, complessivamente, in equilibrio idrostatico: le forze peso sono sempre bilanciate dai gradienti di pressione. Ne consegue che la pressione è massima vicina alla superficie, mentre diminuisce con l'altitudine in maniera esponenziale. La temperatura non presenta un andamento che è possibile estendere a tutta l'atmosfera, ma varia in funzione dei differenti processi di estinzione della radiazione solare. Nella troposfera, lo strato più vicino alla superficie, la temperatura diminuisce con l'aumentare della quota. Il tasso di variazione è definito *lapse rate* e rappresenta uno dei parametri più importanti nella modellazione della risposta climatica alle perturbazioni.

L'azoto inerte, l'ossigeno e l'argon interagiscono solo parzialmente con le radiazioni solari incidenti, perlopiù attraverso fenomeni di scattering, e non influiscono in alcun modo sulla radiazione infrarossa terrestre.

Alcuni dei gas traccia, quali l'anidride carbonica, il metano, il protossido di azoto e l'ozono, ed il vapore acqueo assorbono e riemettono la radiazione infrarossa terrestre, comportando un riscaldamento della superficie attraverso l'effetto serra. Inoltre, il vapore acqueo, l'anidride carbonica e l'ozono assorbono anche le radiazioni ultraviolette.

L'atmosfera è il componente più instabile e variabile del sistema climatico. Ciò è dovuto principalmente alla presenza dell'acqua nelle varie forme di aggregazione come vapore, nuvole, gocce o cristalli di ghiaccio. Il vapore acqueo è uno dei gas serra più abbondanti ed è responsabile del trasporto di diversi flussi energetici all'interno del sistema climatico.

L'ozono svolge un ruolo fondamentale all'interno del sistema climatico: l'ozono troposferico si comporta da gas a effetto serra, mentre l'ozono stratosferico svolge un ruolo di schermaggio dalle radiazioni solari ultraviolette, potenzialmente dannose per gli ecosistemi terrestri [14] [15].

3.1.2-La criosfera

La criosfera è costituita da tutte quelle porzioni della terra in cui l'acqua è in forma solida e, quindi, include i ghiacci marini, i laghi ghiacciati, i ghiacciai, il suolo ghiacciato stagionalmente ed il permafrost, le coperture nevose e le calotte polari. Se ne deduce che parte della criosfera si converte parzialmente in idrosfera durante l'anno e viceversa. Essa è principalmente diffusa nelle regioni polare e nelle catene montuose più elevate.

La neve è presente in entrambe le regioni e può essere caratterizzata da un ciclo stagionale o contribuire alla formazione di ghiacciai e lastre di ghiaccio. Essa può confluire in falde acquifere sotterranee o fiumi e causare diversi fenomeni naturali pericolosi come valanghe e inondazioni nevose. Inoltre, essa svolge un ruolo fondamentale nel mantenimento degli ecosistemi regionali a causa dell'elevato coefficiente di albedo e all'isolamento che effettua sulla porzione di permafrost ricoperto.

Le calotte polari ed i ghiacciai sono ammassi di ghiaccio costruiti dall'accumulo e la ricristallizzazione di neve. Essi ricoprono attualmente circa il 3% della superficie globale, l'11% della superficie terrestre

ed il 5% dell'Alaska. I ghiacciai sono, spesso, poggiati su un letto di rocce che si trova al di sotto del livello del mare. Il calore trasferitogli dagli oceani comporta una perdita irreversibile di massa che contribuisce all'innalzamento del livello del mare.

Il mar glaciale si forma a causa della solidificazione di acqua marina e all'ispessimento della superficie ghiacciata dall'accumulo di neve. Esso può essere compatto o essere costituito da parti separate che vengono trasportati dalle correnti oceaniche e atmosferiche. Inoltre, svolge differenti ruoli fondamentali all'interno dell'ecosistema climatico: garantisce il mantenimento degli ecosistemi regionali, regola il bilancio radiativo attraverso l'albedo elevato ed isola scambi massici ed energetici tra atmosfera e oceano.

Quando si forma la banchisa, solo una frazione molto piccola di sale viene intrappolata nella struttura cristallina del ghiaccio; la maggior parte viene espulsa verso l'oceano sottostante. Ne consegue, quindi, che lo scioglimento dei ghiacciai corrisponde ad una parziale desalinizzazione degli oceani e a grosse modifiche degli ecosistemi esistenti.

Il permafrost è terreno o rocce contenenti ghiaccio e composti organici congelati che rimane al di sotto dei 0° per almeno due anni. Esso, analogamente ai ghiacciai, può trovarsi sia ad elevate latitudini che altitudini. Lo spessore può variare dall'ordine dei metri alle centinaia e le migliaia. A differenza degli elementi precedenti, non è possibile ottenere dati satellitari attendibili circa le variazioni di questa componente [2] [15] [16].

3.1.3- La litosfera

Essa è costituita dall'involucro solido più esterno della Terra, dello spessore di 70-100 km, definito anche crosta terrestre. La composizione chimica è costituita per il 95% da rocce ignee e per il 5% da rocce sedimentarie e metamorfiche, con prevalenza di minerali di silicio e alluminio.

Molte caratteristiche climatiche sono influenzate dalla distribuzione e dalla topografia della crosta terrestre. Le catene montuose giocano un ruolo fondamentale su scala emisferica: esse influenzano le onde planetarie⁴⁰ e la circolazione atmosferica globale.

La distanza dalle coste influisce significativamente sulla temperatura e sull'aridità di una regione; mentre la batimetria oceanica influenza la circolazione marina, definendo la posizione della corrente occidentale forte e degli stretti che permettono gli scambi massici tra bacini differenti.

La forma e, persino, l'esistenza delle calotte polari è strettamente condizionato dal letto di rocce sottostante. Occorre, inoltre, rimarcare che essa svolge un ruolo fondamentale nel ciclo biogeochimico del carbonio assorbendo circa il 30% delle emissioni antropogeniche di anidride carbonica [17].

3.1.4-La biosfera

La biosfera è costituita da tutti gli ecosistemi esistenti sulla Terra, ossia da tutti gli esseri viventi e gli ambienti fisici in cui vivono. Le caratteristiche principali della biosfera sono la biodiversità, ossia la diversità degli ecosistemi a causa delle condizioni di pressione, temperatura, umidità e concentrazioni di nutrienti differenti, e le loro interazioni. Essa comprende la parte bassa dell'atmosfera, tutta l'idrosfera e la parte superficiale della litosfera, fino a 2 km di profondità.

La vegetazione terrestre svolge un ruolo fondamentale all'interno del sistema climatico. Generalmente, l'albedo della vegetazione è inferiore a quello della crosta terrestre, è addirittura

⁴⁰ Le onde planetarie sono strutture che caratterizzano i moti dei fluidi geofisici a scala sinottica e planetaria. Il sistema presenta un perfetto bilancio tra le forze di pressione e la forza di Coriolis, per questa ragione il fluido oscilla attorno ad una posizione di equilibrio inerziale.

minore di quello dei deserti. Essa ha un forte impatto anche sul ciclo idrogeologico: l'accumulo di acqua è maggiore sul suolo ricoperto da vegetazione piuttosto che sul suolo nudo. L'acqua accumulata viene assorbita dalle radici e trasferita nuovamente in atmosfera attraverso il processo di evapotraspirazione. Infine, la presenza di vegetazione modifica il coefficiente di rugosità del suolo, influenzando i fenomeni di scambio turbolento tra atmosfera e litosfera.

La respirazione cellulare e la fotosintesi svolgono un ruolo centrale nel ciclo carbonioso terrestre. Altre emissioni biosferiche includono metano, protossido di azoto, acido solforico ed i composti organici volatili [3].

3.1.5-L'idrosfera

L'idrosfera è costituita dall'acqua presente nei vari stati di aggregazione sulla terra: in forma di fiumi, laghi, oceani, mari, falde acquifere sotterranee, vapore acqueo e all'interno di rocce. L'idrosfera si sovrappone parzialmente alla criosfera e alla biosfera.

Il deflusso di acqua dolce dalla terra che ritorna negli oceani attraverso i fiumi influenza la composizione e la circolazione degli oceani, che ricoprono circa il 70% della superficie terrestre. Essi immagazzinano e trasportano una grande quantità di energia e dissolvono e immagazzinano grandi quantità di anidride carbonica.

La loro circolazione, spinta dal vento e dai contrasti di densità causati dalla salinità e dai gradienti termici, attraverso la cosiddetta circolazione termoalina, è molto più lenta della circolazione atmosferica. A causa della grande inerzia termica dell'acqua, gli oceani fungono da regolatore del clima terrestre e come fonte di variabilità climatica naturale [14].

3.2-Il global energy budget

3.2.1-Il bilancio energetico sulla sommità dell'atmosfera

Quasi la totalità dell'energia entrante nel sistema climatico proviene dal sole sotto forma di radiazione elettromagnetica. Vi sono, anche, delle sorgenti aggiuntive legate ai decadimenti radioattivi del torio e dell'uranio che avvengono nel mantello; il cui contributo è, però, così piccolo che può essere trascurato. Al fine di effettuare il bilancio energetico sulla superficie terrestre, viene inizialmente effettuato il bilancio energetico esterno all'atmosfera.

La costante solare è la radiazione solare che si misura alla sommità dell'atmosfera terrestre per unità di superficie. Attraverso l'applicazione delle leggi fondamentali dello scambio termico radiativo, è possibile calcolarne il valore. Se si considera il sole come un corpo nero ideale, la sua temperatura superficiale risulta essere pari circa a 5800 K. Applicando la legge di Stefan Boltzmann, è possibile calcolare l'emittanza termica solare nel modo seguente:

$$I = \sigma * T^4 = 5,67 * 10^{-8} * (5800)^4 = 6,417 * 10^7 \text{ W/m}^2 \quad (3.1)$$

Per ottenere l'energia totale emessa dal sole nell'unità di tempo, occorre moltiplicare il potere emissivo per la superficie del sole. Il sole è approssimativamente una sfera di raggio $R = 6,96 \cdot 10^8 \text{ m}$. L'area di una sfera è $4\pi R^2$, quindi l'energia totale irradiata dal sole nell'unità di tempo è:

$$E_{tot} = I * 4\pi R^2 = 6,417 \cdot 10^7 \cdot 4\pi \cdot (6,96 \cdot 10^8)^2 = 3,906 \cdot 10^{26} \text{ W} \quad (3.2)$$

Questa energia si propaga dal sole nello spazio circostante in tutte le direzioni. Essa si distribuisce uniformemente su un guscio sferico di raggio pari alla distanza tra la terra ed il sole, che è pari a $R_{TS} = 1,50 \cdot 10^{11} \text{ m}$. Per ottenere l'energia che arriva sulla superficie esterna dell'atmosfera è sufficiente dividere l'energia totale emessa per la superficie di questo guscio sferico:

$$G_s = \frac{E_{tot}}{(4\pi R_{TS}^2)} = \frac{3,906 \cdot 10^{26}}{(4\pi \cdot (1,50 \cdot 10^{11})^2)} \sim 1380 \text{ W/m}^2 \quad (3.3)$$

In media, l'energia solare totale sulla sommità della superficie terrestre sarà pari al prodotto tra la sezione trasversale della terra, che ha un raggio $R_T=6371$ km, e la costante solare. Occorre sottolineare che si è ipotizzato che l'atmosfera abbia uno spessore trascurabile rispetto al raggio terrestre, approssimazione che risulta essere ragionevole considerando l'ordine di grandezza di differenza tra i due valori considerati.

$$E_{tot, in} = G_s * \pi R_T^2 \quad (3.4)$$

Il flusso di calore proveniente dal sole deve essere compensato da un equivalente flusso disperso da parte della terra. Se questa ipotesi di stazionarietà non fosse vera, la temperatura terrestre varierebbe in funzione del calore accumulato. La radiazione emessa dalla terra appartiene allo spettro infrarosso, come è possibile evincere applicando la legge di Wien. Se si ipotizza che anche la terra possa essere considerata un corpo nero ideale è possibile valutare l'emittenza termica utilizzando nuovamente la legge di Stefan-Boltzmann:

$$I_T = \sigma * T_T^4 \quad (3.5)$$

La terra emette energia in tutte le direzioni, ne consegue che, per calcolare l'energia totale emessa, occorrerà valutare il prodotto tra l'emittenza e la superficie sferica terrestre:

$$E_{tot, t} = I_T * 4\pi R_T^2 \quad (3.6)$$

Al fine di raggiungere l'equilibrio sulla superficie terrestre, considerando il contributo dei processi di riflessione atmosferici attraverso il coefficiente di albedo terrestre ρ , è possibile riportare:

$$\text{Energia solare assorbita} = \text{Energia terrestre emessa}$$

$$E_{tot, in} * (1 - \rho) = E_{tot, t} \quad (3.7)$$

Effettuando alcuni passaggi matematici:

$$\frac{G_s}{4} * (1 - \rho) = I_T \quad (3.8)$$

La formula precedente può essere considerata il bilancio energetico medio sulla superficie terrestre. Il fattore $(1 - \rho)$ descrive il contributo dei processi di estinzione atmosferici, mentre il fattore di riduzione di un quarto è correlato alla geometria sferica terrestre, quindi ad un processo di estinzione equivalente sulla sommità dell'atmosfera.

3.2.2 L'effetto serra ed il concetto di Global Warming Potential

La radiazione solare è distribuita su un ampio spettro elettromagnetico: il massimo è centrato nella banda del visibile che contiene il 48% della radiazione totale, la banda infrarosso ne contiene circa il 43%, mentre la restante parte appartiene all'ultravioletto. Circa un terzo della radiazione solare viene riflessa nello spazio, mentre l'altra parte viene assorbita, principalmente, dalla superficie terrestre e, in misura minore, dall'atmosfera.

A causa della temperatura media minore della terra, l'emissione radiativa terrestre avviene a lunghezze d'onda appartenenti all'infrarosso. Queste onde elettromagnetiche ad elevata lunghezza d'onda vengono assorbite dai gas serra in atmosfera e rimesse, a sua volta, verso la terra, intrappolando calore all'interno dello strato superficiale del pianeta. Questo effetto naturale è alla base dello sviluppo della vita sulla terra, in assenza del quale si troverebbe a temperature al di sotto del punto triplo dell'acqua [15].

Nelle aree equatoriali, caratterizzate da un'abbondanza relativa di vapore acqueo maggiore, l'effetto serra è talmente intenso che l'incremento dei flussi di anidride carbonica ha comportato un effetto diretto meno rilevante. Invece, nelle regioni polari, un incremento delle concentrazioni di anidride carbonica e vapore acqueo ha indotto significative perturbazioni. Considerazioni analoghe possono essere effettuate sulla introduzione di un flusso di gas serra negli strati superiori dell'atmosfera, in cui si hanno concentrazioni relative molto piccole.

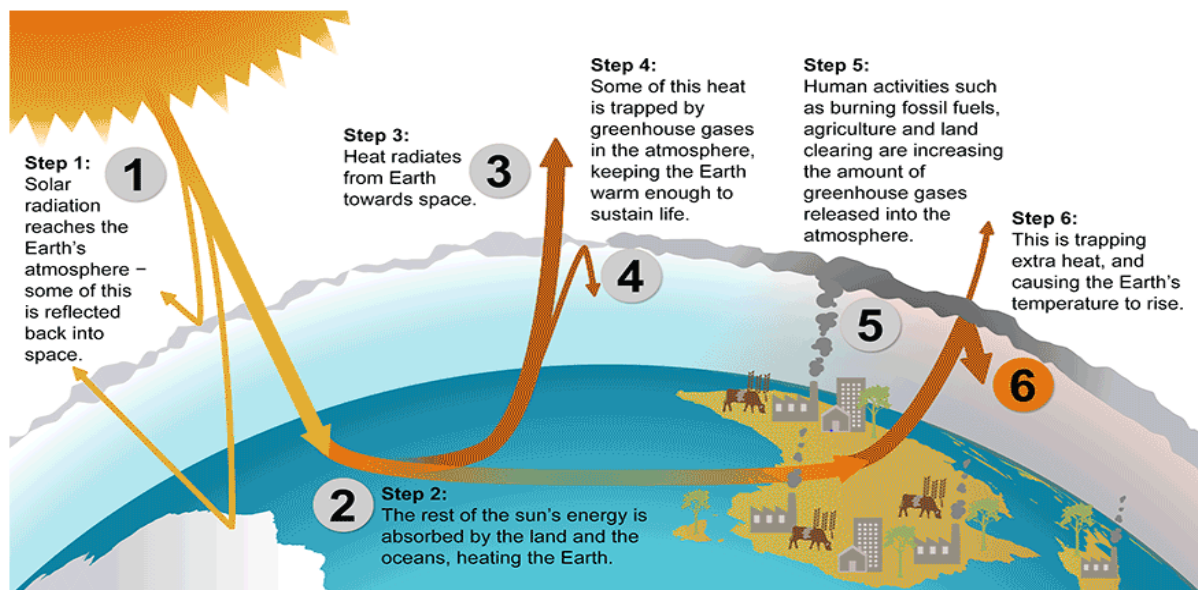


Figura 16: Intensificazione dell'effetto serra. In questo grafico viene schematizzata l'intensificazione dell'effetto serra, causata dalle attività umane correlate all'utilizzo di combustibili fossili e all'ingente uso territoriale. La variazione della composizione chimica atmosferica è la principale causa dell'innalzamento delle temperature superficiali. **Fonte: Australian Government- Department of water and agriculture**

L'incremento delle emissioni antropogeniche di anidride carbonica ha causato un'intensificazione dell'effetto serra (**Figura 16**). Le concentrazioni di questi gas sono strettamente correlate a differenti feedback climatici. Il più pericoloso è, indubbiamente, il feedback positivo del vapore acqueo: a causa dell'innalzamento della temperatura e il relativo incremento del flusso evaporativo di acqua, le concentrazioni di vapore acqueo aumentano ed introducono un forzante radiativo ulteriore nel sistema climatico.

Al fine di valutare strategie di abbattimento e limitazione delle emissioni antropogeniche, occorre fornire un parametro che rifletta l'impatto di ogni gas serra al cambiamento climatico. Il Global Warming Potential è uno strumento adatto per effettuare queste considerazioni. Esso è definito come la media globale integrale nel tempo del forzante radiativo associato all'emissione impulsiva di 1 kg di un gas rispetto a quello associato all'emissione di 1 kg di anidride carbonica. Esso riflette gli aspetti correlati all'efficienza radiativa, ossia alla capacità di assorbire calore e allo spettro elettromagnetico coinvolto, e alla vita media [18].

$$GWP = \frac{\int_0^T RF_i(t) dt}{\int_0^T RF_{CO_2}(t) dt} \quad (3.9)$$

In cui:

- T è l'intervallo temporale considerato
- RF è il forzante radiativo medio
- Il pedice i è riferito all' i-esimo gas, mentre CO₂ è riferito all'anidride carbonica

3.2.3-Il ciclo idrogeologico

Il ciclo idrogeologico svolge un ruolo importante nel ciclo energetico sulla Terra. Esso ha, infatti, un notevole impatto sul bilancio radiativo: il vapore acqueo è il gas serra più abbondante sia in peso che in volume nell'atmosfera. La presenza di neve e ghiaccio modifica fortemente l'albedo della superficie e le nuvole influenzano sia i flussi delle onde infrarosse che quelli delle onde ultraviolette.

L'acqua è un veicolo essenziale per gli scambi energetici a causa della grossa capacità termica: il calore latente rilasciato durante la condensazione dell'acqua è una fonte di riscaldamento dominante per l'atmosfera ed i suoi fenomeni di trasporto, correlati alla circolazione atmosferica e oceanica, introducono termini di scambi radiativi orizzontali essenziali nei bilanci energetici.

La massa di acqua totale rimane costante nel tempo, in quanto il sistema climatico è chiuso rispetto la massa, ma la suddivisione nelle riserve varia in funzione dello stato del sistema climatico. I processi fisici di interesse sono evaporazione, condensazione, precipitazione ed infiltrazione.

La più grande riserva di acqua è localizzata all'interno della crosta terrestre, però, a causa delle scarse interazioni con le altre riserve, non viene considerata nel bilancio massico del ciclo. L'evaporazione oceanica induce un flusso di 413 chilometri cubi di acqua al secondo verso l'atmosfera, che, attraverso le precipitazioni, ne restituisce il 90% agli oceani e la restante parte alla terraferma. L'evapotraspirazione terrestre induce, invece, un flusso pari a 73 chilometri cubi al secondo. Sommando il contributo dell'evaporazione oceanica e terrestre, si valuta un flusso relativo alle precipitazioni terrestri di circa 113 chilometri cubi al secondo. Infine, occorre considerare un flusso netto entrante dalla terraferma agli oceani, attraverso fiumi e falde acquifere sotterranee, per bilanciare gli scambi di portata analizzati (**Figura 17**).

L'effetto complessivo, virtualmente certo, del surriscaldamento globale è un'intensificazione del ciclo idrogeologico dell'acqua. In particolare, l'aumento di temperatura causa un relativo incremento dei fenomeni di evapotraspirazione ed evaporazione, nonché lo scioglimento dei ghiacciai e del mar glaciale artico. Ne consegue che il quantitativo e l'intensità delle precipitazioni aumenta sospinto dai precedenti driver climatici. A causa delle complicità relative alle misurazioni delle precipitazioni globali, non è possibile affermare che la teoria sia scientificamente certa; sebbene sia in linea con i dati raccolti in Europa ed in Nord America.

Infine, il ciclo idrogeologico gioca un ruolo fondamentale nella modellazione dell'ambiente terrestre e degli ecosistemi esistenti. La disponibilità di acqua è un fattore critico per la vita, nonché per molte reazioni chimiche e trasformazioni che interessano l'ambiente fisico. La descrizione delle varie componenti del ciclo idrologico e l'analisi dei meccanismi responsabili degli scambi d'acqua tra i diversi serbatoi sono, per queste ragioni, elementi importanti della climatologia [19] [2].

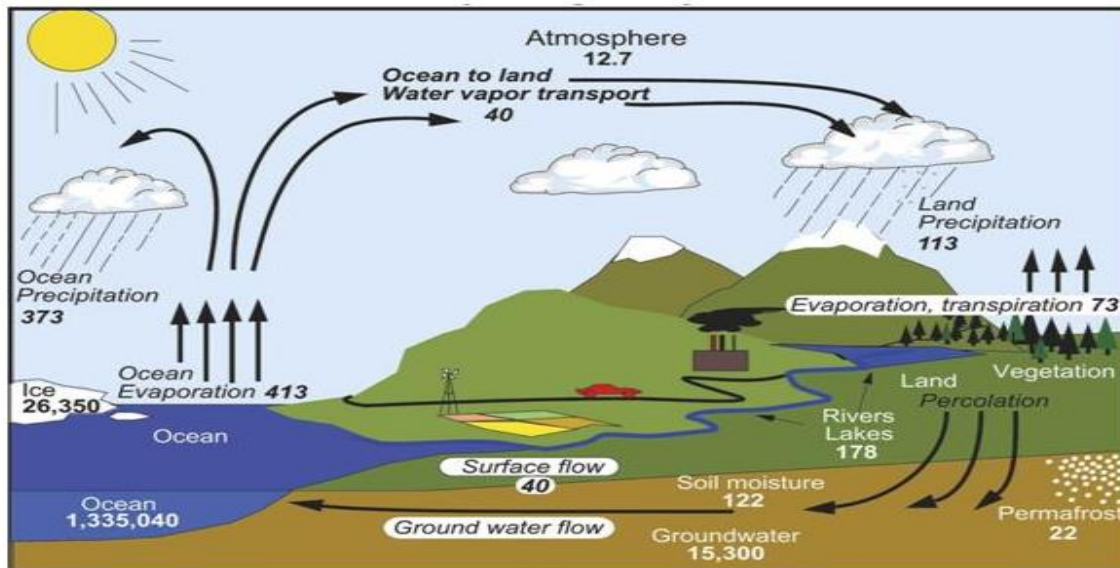


Figura 17: Schema semplificato del ciclo idrogeologico. La stima delle principali riserve d'acqua è fornita in chilometri cubi, mentre i flussi scambiati sono riportati in chilometri cubi al secondo. Fonte: Trenberth et al. (2007)

3.2.4- Il ciclo biogeochimico del carbonio

Il ciclo biogeochimico del carbonio è caratterizzato da diversi pozzi che scambiano flussi di carbonio attraverso interazioni chimiche e fisiche. È possibile distinguere due domini nel ciclo carbonioso in funzione delle scale temporale dei relativi processi di turnover biologico: il ciclo carbonioso veloce e quello lento.

Il primo è caratterizzato da un turnover biologico rapido, che può essere compreso tra gli anni ed i millenni, e scambi di grossi flussi tra atmosfera, oceano e vegetazione terrestre. Mentre il secondo è caratterizzato da un turnover lento, dell'ordine delle decine di migliaia di anni, e da scambi di flusso tra le enormi riserve di carbonio immagazzinate nelle rocce e nei sedimenti della crosta con le componenti del ciclo veloce attraverso emissione di anidride carbonica vulcanica, degradazione meteorica e fenomeni di erosione. Gli scambi naturali tra ciclo lento e rapido risultano essere costanti nel tempo e molto piccoli rispetto ai flussi scambiati nel ciclo veloce.

A causa del rilascio di carbonio antropogenico legato principalmente alla combustione di fonti fossili e ai cambiamenti nell'uso del suolo, il flusso biogeochimico terrestre è stato intensificato significativamente (**Figura 18**). Circa il 45% di queste emissioni è stato assorbito dall'atmosfera, fenomeno che esplica l'aumento osservato dell'anidride carbonica. La frazione rimanente è stata assorbita dall'oceano, approssimativamente il 30%, e per un quarto dalla biosfera terrestre.

La biosfera terrestre contiene carbonio sottoforma di composti organici nella biomassa vivente (450-650 PgC⁴¹), materia organica morta nel suolo (1500-2400 PgC), terreno carbonioso nelle zone umide (300-70 PgC) e nel permafrost (1700 PgC). L'anidride carbonica viene rimossa dall'atmosfera attraverso la fotosintesi (123 PgC a⁻¹)⁴², che ritrasferisce metà di questo flusso attraverso la respirazione e incorpora l'altra metà in foglie, boschi e radici. Quest'ultima componente ritorna nell'atmosfera attraverso la decomposizione delle piante nel suolo, la respirazione di erbivori e carnivori, e la combustione.

⁴¹ Peta grammi di carbonio.

⁴² Peta grammi di carbonio all'anno.

Un contributo significativo è trasferito dal suolo alle sorgenti dei fiumi (1,7 PgC a⁻¹), che ritrasferiscono circa metà di questo flusso all'atmosfera, seppelliscono una parte molto piccola nei sedimenti organici e trasportano l'altra metà negli oceani come carbone dissolto organico, non organico e particolato organico.

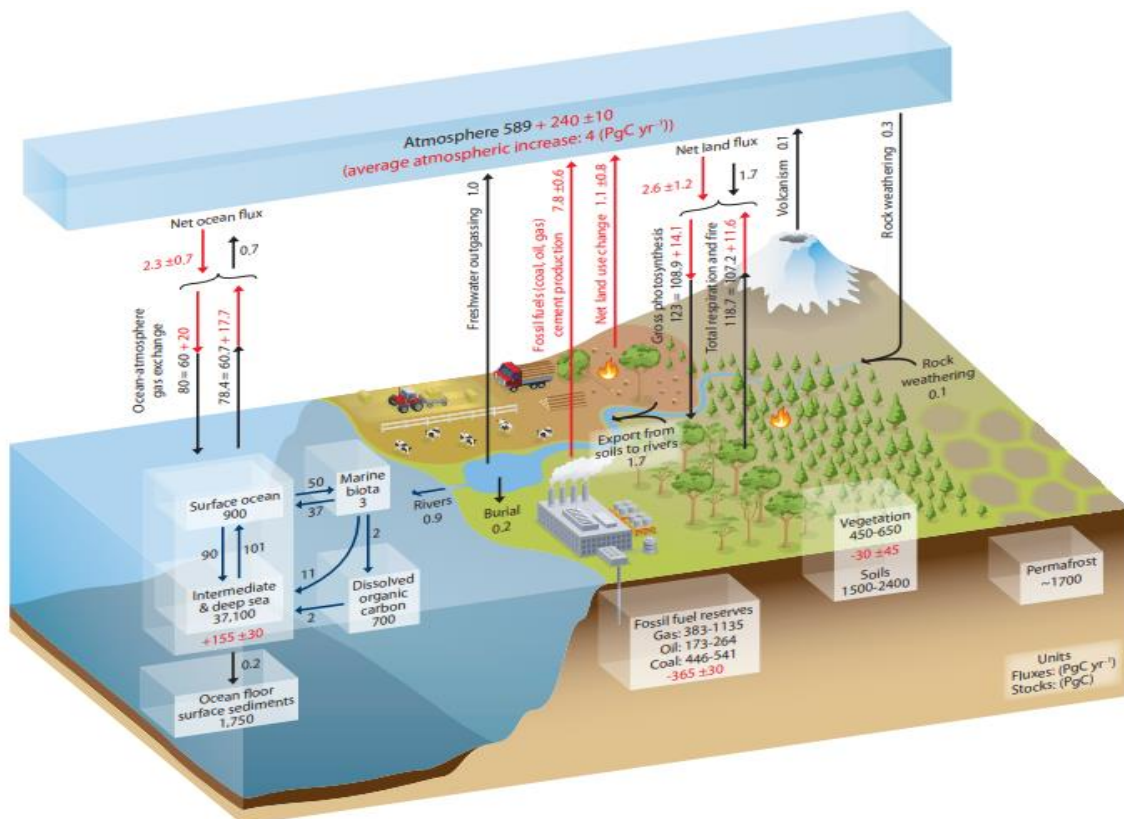


Figura 18: Schema semplificato del ciclo del carbonio e le modifiche antropogeniche. I numeri rappresentano le riserve di carbonio in Peta-grammi ed i flussi di carbonio scambiati in Peta-grammi all'anno. I numeri e le frecce in nero si riferiscono al ciclo carbonioso prima dell'era industriale, mentre quelli in rosso quantificano le perturbazioni introdotte dall'uomo. Infine, il segno indica un effetto cumulativo in caso di valore positivo, mentre una riduzione in caso di segno negativo.

Fonte: **IPCC AR5**

La riserva oceanica di carbonio (38000 PGc) è, principalmente, presente sottoforma di DIC, ossia di acido carbonico, bicarbonato e ioni carbonato in equilibrio chimico. Inoltre, vi è un'altra riserva più piccola di carbonio organico dissolto (DOC, 700 PgC) che presenta un turnover biologico di circa un migliaio di anni. Infine, occorre considerare anche il fitoplancton che rappresenta una piccola riserva organica di 3PgC.

Un flusso di anidride carbonica tra oceano ed atmosfera si verifica ogni qual volta il contenuto carbonioso della superficie oceanica non è in equilibrio con la concentrazione atmosferica. Il flusso Φ_{CO_2} dall'oceano all'atmosfera è proporzionale a questo squilibrio e può essere calcolato in funzione della differenza di pressione parziale p_{CO_2} tra i due mezzi:

$$\Phi_{CO_2} = k_{CO_2}(p_{w,CO_2} - p_{a,CO_2}) \quad (3.10)$$

in cui:

- I pedici w e a sono usati per indicare rispettivamente l'acqua e l'aria
- k_{CO_2} è un coefficiente di trasferimento che dipende dalla velocità del vento

All'equilibrio non vi sono scambi di flussi, in quanto p_{w,CO_2} è, ovviamente, uguale a p_{a,CO_2} . Poiché la concentrazione di anidride carbonica in atmosfera è quasi omogenea, la ripartizione del flusso dipende principalmente dalla pressione parziale dell'anidride carbonica oceanica. Nelle zone soprassature, in cui la pressione parziale della CO₂ oceanica è superiore a quella nell'aria, si verifica un flusso positivo dall'oceano all'atmosfera [17] [20] [2].

3.2.5-Bilancio energia termica sulla superficie terrestre

Come discusso nel **paragrafo 3.2.1**, la radiazione solare entrante su una superficie orizzontale nella parte superiore dell'atmosfera è di circa 342 Wm⁻², a causa delle perdite correlate alla sfericità terrestre. Circa un terzo di questa radiazione viene riflessa direttamente indietro nello spazio a causa dell'albedo terrestre complessivo. Come è possibile evincere in **Figura 19**, più del 70% della riflessione avviene nell'atmosfera, principalmente a causa della presenza di nuvole e aerosol, mentre il restante 30% viene riflesso dalla superficie terrestre.

Al contrario, la maggior parte dell'assorbimento della radiazione solare avviene sulla terra, che assorbe circa due volte e mezzo l'energia assorbita dall'intera atmosfera. Ciò dimostra chiaramente che la maggior parte del riscaldamento atmosferico avviene dal basso e non attraverso l'assorbimento diretto delle radiazioni solari. Questa importante proprietà del sistema spiega le principali caratteristiche dell'atmosfera terrestre, compreso il profilo verticale della temperatura e la circolazione su larga scala dell'atmosfera.

Le radiazioni infrarosse in uscita, necessarie per completare il bilancio radiativo globale alla tropopausa, sono emesse principalmente dall'atmosfera e dalle nuvole. Infatti, dei 398 Wm⁻² emessi dalla superficie terrestre sotto forma di radiazione infrarossa, solo circa 50 Wm⁻² vengono irradiati direttamente nello spazio. La grande maggioranza delle radiazioni infrarosse è assorbita dai gas atmosferici ad effetto serra e riemessa verso la superficie.

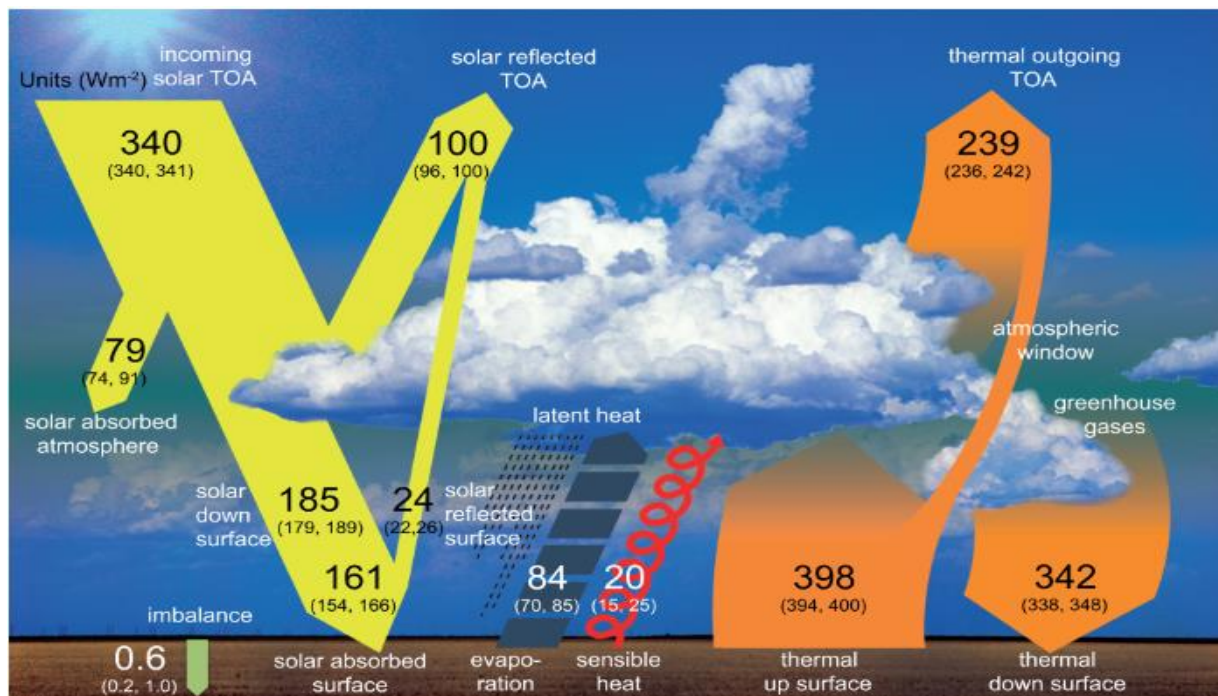


Figura 19: Bilancio energetico globale. In figura, viene riportato il global energy budget per un periodo compreso dal Marzo 2000 al Marzo 2004. Tutti i flussi vengono riportati in W m⁻². In questo periodo, la terra ha assorbito un flusso netto di 0,6 W m⁻² che ha causato l'innalzamento della temperatura media superficiale. **FONTE: Hartmann et al. 2013**

Oltre ai flussi radiativi, la superficie e l'atmosfera si scambiano calore sensibile attraverso contatto diretto, nonché flussi latenti attraverso l'evaporazione e la traspirazione. Quando l'evaporazione avviene sulla superficie terrestre, l'assorbimento di calore ne comporta un raffreddamento. Successivamente, durante la fase di formazione delle nuvole, il vapore acqueo si condensa ed il calore latente viene rilasciato nell'atmosfera. Questo porta ad un trasferimento netto di massa e calore dalla superficie all'atmosfera.

I flussi di calore sensibile e latente sono generalmente stimati in funzione della velocità del vento, ad un livello di riferimento, e la differenza di temperatura, per il flusso termico sensibile, o umidità specifica, per il flusso termico latente.

3.3-Il concetto di forzante e di risposta climatica

3.3.1- La forzante radiativa e la forzante radiativa effettiva

I cambiamenti nell'atmosfera, nella terra, nell'oceano, nella biosfera e nella criosfera, sia di origine naturale che antropogenica, possono perturbare il bilancio radiativo globale producendo un forzante radiativo che influenza il clima. Esso è una misura della variazione netta del bilancio energetico in risposta ad una perturbazione esterna. Le cause dei cambiamenti climatici possono includere, per esempio, cambiamenti nell'irradianza solare e cambiamenti atmosferici relative ai gas traccia o aerosol. La IPCC ha sviluppato differenti definizioni di forzante radiativo, al fine di sottolineare la risposta climatica in funzione di differenti scale temporali. La relazione presunta tra forzante radiativo e temperatura superficiale media globale è riportata di seguito:

$$\Delta T = \gamma * \Delta FR \quad (3.11)$$

In cui:

- ΔT rappresenta la variazione di temperatura media superficiale
- γ è la sensibilità climatica alle perturbazioni
- ΔFR è il forzante radiativo netto

Come è possibile evincere dall'equazione **(3.11)**, si ipotizza che il cambiamento netto radiativo possa essere isolato rispetto alle successive risposte climatiche generate dalla perturbazione iniziale. A causa, però, dei complessi cicli di feedback del sistema climatico, questa assunzione risulta essere a tratti ambigua a causa dello scarso discernimento tra perturbazione iniziale e risposta climatica al forzamento. Queste non sono, infatti, sempre chiaramente separabili ed introducono un livello di incertezza nel calcolo del forzante radiativo netto.

Il concetto di forzante radiativo non può, però, catturare le interazioni di aerosol e nuvole antropogeniche. Per questa ragione, è stato introdotto un nuovo concetto, il forzante radiativo effettivo, che meglio rappresenta le risposte più rapide del sistema climatico. Esso è definito come la variazione del flusso netto verso il basso nella tropopausa dopo aver tenuto conto delle variazioni rapide di temperature atmosferiche, delle concentrazioni di vapore acqueo, copertura nuvolosa e variazione dell'albedo terrestre, ma con la temperatura dell'idrosfera e criosfera o con la temperatura media globale della superficie invariata.

3.3.2- La risposta stazionaria e transitoria alle perturbazioni

In risposta ad un forzante radiativo ΔFR , le differenti componenti del sistema climatico cambieranno stato, modificando il bilancio radiativo globale alla tropopausa e la propria condizione di equilibrio. Queste modifiche non sono dirette, ma sono legate a complessi cicli dinamici interdipendenti. I

modelli computazioni più semplici, si basano sull'assunzione che i cambiamenti del bilancio radiativo possano essere stimati in funzione del forzante radiativo netto introdotto e della variazione della temperatura media globale superficiale. Denotando, quindi, lo sbilancio radiativo con ΔE , è possibile scrivere:

$$\Delta E = \Delta FR + \lambda_f \Delta T \quad (3.12)$$

in cui:

- λ_f è definito come il parametro di feedback [$\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$]
- la convenzione di segno per i flussi entranti è positiva

Se la perturbazione introdotta non è istantanea, il sistema raggiungerà una nuova condizione di equilibrio. Ciò implica che alla tropopausa non vi sarà più alcun sbilancio radiativo e la temperatura media globale può essere valutata come segue:

$$\Delta T = -\frac{1}{\lambda_f} \Delta FR \quad (3.13)$$

Confrontando la precedente equazione con (3.11), si ottiene:

$$-\frac{1}{\lambda_f} = \gamma \quad (3.14)$$

Il fattore $-\frac{1}{\lambda_f}$ rappresenta quindi la sensibilità climatica all'equilibrio ed è, spesso, determinata attraverso simulazioni con modelli climatici più complessi, quali AOGCM o EMS. Per ragioni pratiche, questo parametro è definito in letteratura come la variazione di temperatura media superficiale associata al raggiungimento di una nuova condizione di equilibrio da parte del sistema climatico in seguito al raddoppio delle concentrazioni di anidride carbonica.

Occorre rimarcare che la risposta asintotica alle perturbazioni esterne è raggiunta solo quando la totalità delle componenti climatiche giunge alla condizione di equilibrio. A causa della grossa inerzia termica terrestre, questo processo può protrarsi per centinaia o, persino, migliaia di anni. Per questa ragione, la IPCC ha introdotto la definizione di risposta transitiva climatica che consiste nella variazione di temperatura media annuale in un periodo di 60 o 80 anni per un aumento della concentrazione annuo dell'1% sino al raggiungimento del doppio della concentrazione iniziale. Questo valore presenta un livello di incertezza minore rispetto alla sensibilità climatica all'equilibrio, in quanto è limitata dalle variazioni di temperatura media registrate annualmente [2].

3.3.3-I driver naturali

3.3.3.1-L'attività solare

L'irradianza solare totale misurata dal satellite "Total Irradiance Monitor" durante il "Solar Radiation and Climate experiment" è di $1360,8 \pm 0,5 \text{ W/m}^2$. Le misurazioni del satellite "PREcision Monitor Sensor" hanno confermato il valore assoluto della costante solare. Analizzando i dati satellitari disponibili dal 1973, si nota che, sebbene le variazioni complessive della radiazione solare ammontino solo allo 0,1%, i cambiamenti spettrali siano molto più grandi, dell'ordine delle decine percentuali. Le variazioni spettrali più importanti hanno interessato le lunghezze d'onda quasi ultraviolette (UV) e più corte. Gli studi scientifici odierni hanno imputato questa perturbazione dello spettro solare alla riduzione dell'ozonofera, concludendo che le relazioni tra i cambiamenti

nell'irradianza e i cambiamenti nella composizione atmosferica sono tali da non essere direttamente correlati ai cambiamenti del flusso radiativo solare.

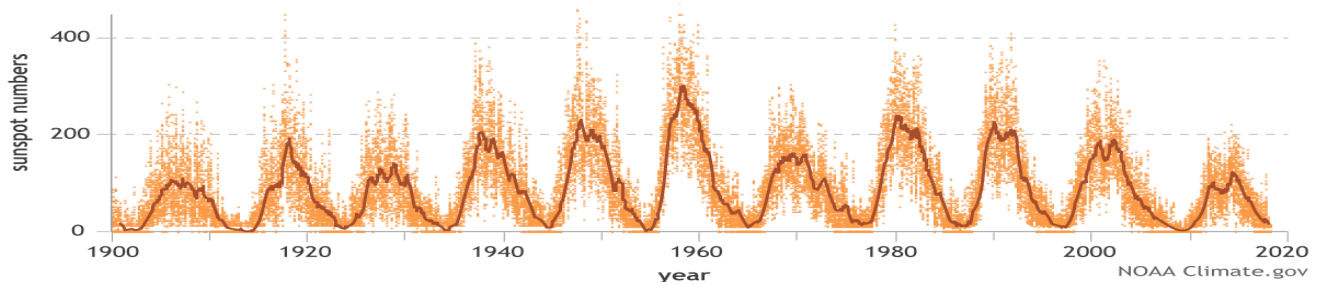


Figura 20: Cicli solari. Nonostante l'attività solare sia aumentata nell'ultimo ventennio⁴³, la sostanziale mancanza di variazione dell'irraggiamento solare incidente dal 1970 a questa parte esclude la possibilità che questa sia la causa del surriscaldamento globale. **Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration**

3.3.3.2-Le eruzioni vulcaniche

La maggior parte delle eruzioni vulcaniche sono classificate come eventi minori, in quanto gli effetti delle emissioni sono limitati alla troposfera e hanno una durata che varia dalle settimane ai mesi. Al contrario, eruzioni vulcaniche esplosive iniettano notevoli quantità di anidride solforosa e ceneri nella stratosfera, che portano a significativi effetti climatici a breve termine. L'anidride solforosa si ossida formando acido solforico che, condensandosi e formando nuove particelle o aggiungendo massa alle particelle preesistenti, amplifica l'attenuazione della luce solare trasmessa attraverso la stratosfera.

L'incremento della profondità degli aerosol genera un forzante radiativo negativo che comporta un progressivo raffreddamento del pianeta. Lo sbilancio radiativo permane nella troposfera solo per un intervallo dell'ordine delle settimane, mentre la vita media degli aerosol troposferici è della durata di qualche anno. I vulcani emettono anche anidride carbonica e vapore acqueo, anche se in piccole quantità rispetto ad altre emissioni. Attualmente, le stime delle emissioni annuali di anidride carbonica dei vulcani rappresentano meno dell'1% delle emissioni di CO₂ di tutte le attività antropiche.

3.3.4-I driver antropogenici

3.3.4.1- Well-mixed Green House Gases

I principali gas serra che presentano un'abbondanza relativa omogenea in tutta l'atmosfera sono l'anidride carbonica, il metano ed il protossido di azoto. L'abbondanza atmosferica ed i forzanti radiativi associati a questi gas sono aumentati in modo sostanziale nel corso dell'era industriale.

I flussi di anidride carbonica sono aumentati vertiginosamente nell'era industriale, principalmente a causa della combustione di fossili, del processo di calcificazione del cemento e della deforestazione ed uso intensivo del territorio. Negli ultimi cinquant'anni, il forzante radiativo dell'anidride carbonica ha subito l'aumento relativo maggiore tra tutti i gas serra ben mescolati in atmosfera. I processi fondamentali associati a questi flussi sono già stati discussi nel **paragrafo 3.2.4**.

La concentrazione globale media del metano ed il relativo forzante radiativo sono aumentati sostanzialmente nell'era industriale. Il metano è un gas serra che presenta un GWP più elevato dell'anidride carbonica: esso impatta maggiormente il sistema climatico per unità di massa rispetto all'anidride carbonica, nonostante presenti una vita media minore, pari a circa 12 anni. Il metano

⁴³ Le macchie solari sono fenomeni temporanei sulla fotosfera del Sole che appaiono come macchie più scure rispetto alle aree circostanti. Sono regioni di temperatura superficiale ridotta causata da concentrazioni di flusso di campo magnetico che inibiscono la convezione.

induce effetti climatici indiretti attraverso la variazione della concentrazione di anidride carbonica in atmosfera, attraverso il processo di ossidazione, del vapore acqueo stratosferico e dell'ozono. La concentrazione di metano si è quasi triplicata a partire dall'era industriale ed ha raggiunto circa 1873 ppm. Le fonti di emissioni di metano naturale includono eventi vulcanici, geotermici e filtraggi marini e terrestri; mentre le fonti antropogeniche consistono in emissioni durante la fase di produzione e combustione completa ed incompleta di fonti fossili e biomasse. Le emissioni biogeniche includono sia emissioni naturali, dalle zone umide, dalle termiti e, in piccola parte, dagli oceani, che emissioni antropogeniche, correlate all'agricoltura, in particolar modo alla coltivazione di riso, al bestiame e ai laghi e fiumi artificiali. Le emissioni biogeniche sono, generalmente, prodotte dagli organismi viventi in condizioni di scarso livello di ossigeno attraverso processi di fermentazione di microbi. Il bilancio sulle emissioni di metano è più complesso a causa della variabilità delle fonti naturale e antropogeniche, nonché dei pozzi che ne influenzano l'abbondanza relativa. Le riserve di metano più grandi esistono sottoforma di clatrato ghiacciato, ossia di depositi idratati, nei sedimenti oceanici più bassi e nel permafrost; mentre l'atmosfera risulta essere una riserva relativamente piccola a causa della reattività chimica di questo componente.

Il tasso di incremento della concentrazione media di protossido di azoto e del relativo forzante radiativo è stato minore rispetto a quelli relativi all'anidride carbonica e al metano. Il protossido di azoto è emesso sia naturalmente nel ciclo biogeochimico dell'azoto dagli ecosistemi terrestri, sia da differenti fonti antropogeniche correlate al settore agricolo, manifatturiero e dei trasporti. Prima dell'era industriale, la formazione dell'azoto reattivo da azoto inerte era, unicamente, correlata a processi naturali, quali fulmini e azotofissazione⁴⁴. Il flusso di ritorno avveniva attraverso i processi di denitrificazione atmosferica, in cui l'ammoniaca veniva riconvertita in azoto inerte. Negli ultimi anni, la produzione di azoto reattivo antropogenico è stata molto più elevata del flusso naturale. Il valore attualmente misurabile è di circa 330 ppm con un tasso di crescita annuo di 0,75 ppm a partire dall'inizio dell'era industriale. Le fonti antropogeniche principali includono l'industria di produzione di legumi, la coltura di tuberi e la combustione incompleta di fonti fossili. I processi di fertilizzazione chimica, che sono responsabili circa dell'80 % dell'incremento delle emissioni di questo gas, hanno introdotto un flusso addizionale pari al 40% del totale. Esso presenta un GWP molto più elevato rispetto all'anidride carbonica ed una vita media di circa 120 anni. Il pozzo principale del protossido di azoto è la distruzione fotochimica in atmosfera, che distrugge cataliticamente l'ozono [21] [2] [22].

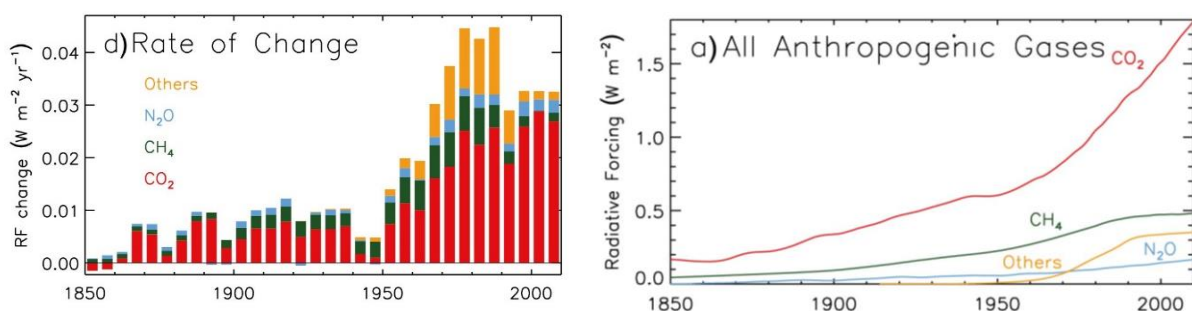


Figura 21: Tasso di variazione annuo del forzante radiativo. (Sinistra) Evoluzione dell'incremento relativo annuo del forzante radiativo annuo. In rosso l'anidride carbonica, in verde il metano, in azzurro il protossido di azoto ed in giallo tutti gli altri gas serra. Evoluzione del forzante radiativo. (Destra) In figura si riporta l'evoluzione del forzante radiativo netto associato ad ogni gas serra dall'inizio dell'era industriale. In rosso l'anidride carbonica, in verde il metano, in azzurro il protossido di azoto ed in giallo tutti gli altri gas serra. **Fonte: IPCC AR5**

⁴⁴ Processo di conversione dell'azoto inerte in ammoniaca attraverso processi microbiotici.

3.3.4.2-Vapore acqueo

Occorre specificare che a differenza dei gas ben mescolati, le emissioni dirette di vapore acqueo influiscono in maniera trascurabile all'aumento del forzante radiativo: il contributo principale è, al contrario, correlato agli effetti indiretti associati all'innalzamento della temperatura e al relativo feedback di rafforzamento.

Le concentrazioni di vapore acqueo nella stratosfera sono regolate attraverso i processi di trasporto dalla troposfera e dall'ossidazione del metano. L'aumento delle emissioni di metano comporta, quindi, un conseguente aumento dell'abbondanza relativa del vapore acqueo stratosferico che causa un ulteriore aumento del forzante radiativo netto agente sul sistema.

Nella troposfera, la concentrazione relativa è, invece, controllata dalla temperatura media superficiale. La circolazione atmosferica limita l'accumulo di vapore acqueo localizzato dovuto alla combustione di fonti fossili o alle torri di raffreddamento degli impianti di produzione di potenza.

3.3.4.3-Ozono

L'ozono è un gas serra, presente sia nella troposfera che nella stratosfera, che è prodotto e distrutto in funzione di differenti fattori naturali e antropogenici. L'abbondanza relativa dell'ozono non è né uniforme né costante a causa della variabilità naturale e antropogenica.

Nella troposfera, le emissioni di metano, di anidride nitrosa e nitrica, di monossido di carbonio e dei composti organici non volatili conducono alla formazione fotochimica dell'ozono, il quale si comporta come un gas serra e amplifica il forzante radiativo. La produzione di ozono è limitata dalla presenza di anidride nitrosa, nitrica e dalla presenza di radicali OH; ne consegue che le concentrazioni presentano significative variazioni regionali (10-100 ppm). I meccanismi principali di distruzione dell'ozono troposferico sono la fotolisi e le reazioni con il vapore acqueo. L'entità di questi meccanismi impatta significativamente sulla vita media dell'ozono, che può variare dai giorni agli anni.

L'ozono stratosferico, che funge da schermo per le radiazioni ultraviolette, è distrutto fotochimicamente dalle specie alogene e dal protossido di azoto. Le emissioni antropogeniche di questi composti hanno comportato una riduzione del 5% dell'ozono stratosferico nel periodo 1970-1995. L'adozione del protocollo di Montreal ed i suoi emendamenti hanno condotto ad una riduzione parziale degli alogeni, garantendo un parziale recupero di ionosfera. A causa della vastità dei processi chimici e fisici interessati, il calcolo del forzante radiativo complessivo associato alle emissioni di ozono è uno dei più complessi ed incerti. La riduzione della ozonosfera e dei relativi processi di riflessione introduce nel sistema climatico un forzante radiativo negativo [2].

3.3.4.4-Cambio dell'utilizzo territoriale

I cambiamenti nella copertura del suolo di natura antropogenica hanno modificato l'albedo terrestre. La deforestazione e l'afforestamento umano hanno comportato un aumento del coefficiente di riflessione, corrispondente ad un forzante radiativo negativo. È necessario sottolineare che questo calcolo è riferito ad un bilancio complessivo: in alcune regioni si è verificato il fenomeno opposto a causa dell'afforestamento intensivo e la diminuzione delle attività di pascolo.

Inoltre, la variazione di uso territoriale ha indotto differenti effetti indiretti, quali la modifica del ciclo biogeochimico del carbonio o l'emissione di aerosol e polvere sottili attraverso modifiche al ciclo idrogeologico. Questi effetti non sono inclusi e quantificati nel forzante radiativo legato alla variazione netta di utilizzo territoriale, ma sono solitamente inclusi nel calcolo del forzante radiativo relativo a emissioni di gas serra ben mescolati in atmosfera e aerosol.

3.3.4.3- Aerosol

La valutazione del forzante radiativo correlato alle emissioni antropogeniche di aerosol è la più complessa e incerta tra i differenti driver climatici. Questa difficoltà è, prettamente, dovuta alla non linearità con la quale interagiscono le fonti ed i pozzi di questi composti.

Gli aerosol possono essere classificati in base alla loro composizione chimica: i solfati, il carbone nero, i composti organici, i nitrati, le polveri sottili ed il sale marino. Le particelle singole di aerosol sono, generalmente, un agglomerato di diversi composti a causa delle trasformazioni fisiche e chimiche che subiscono in atmosfera. Gli aerosol troposferici presentano una vita media breve, che varia dai giorni alle settimane, a causa della natura igroscopica e dalle interazioni col ciclo idrogeologico. La variabilità delle fonti naturali e antropogeniche e la breve vita media implicano una disuniformità spaziale e temporale di questa componente nell'atmosfera.

Gli aerosol influiscono sul sistema climatico in maniera diretta ed indiretta. L'effetto diretto dell'emissioni di aerosol è relazionato al fenomeno di assorbimento e scattering della radiazione solare. Gli effetti indiretti sono, invece, associati alle interazioni degli aerosol con le nuvole e con la criosfera. In particolare, le interazioni aerosol-nuvole dipendono dalla variazione della composizione delle nuvole e la modifica del numero e della grandezza delle goccioline di acqua, che comportano un incremento del coefficiente di riflessione delle nuvole. Infine, la deposizione di albedo sulle coperture nevose e ghiacciate comporta un maggiore assorbimento della radiazione solare ed una conseguente diminuzione del coefficiente di albedo locale.

CAPITOLO 4-I CAMBIAMENTI OSSERVATI ED I MODELLI CLIMATICI

4.0- Panoramica

In questo capitolo vengono riportati, anzitutto, i principali cambiamenti osservati negli indicatori climatici più importanti, quali l'innalzamento della temperatura media superficiale, lo scioglimento del mar glaciale artico e delle calotte polari, l'acidificazione e l'innalzamento del livello degli oceani e le intensificazioni di eventi estremi. Secondariamente, si effettua una breve descrizione dei modelli climatici in cui si introducono le tipologie fondamentali e si discute il grado di incertezza degli output. Infine, viene descritto il modello Java Climate Model utilizzato nel processamento degli scenari analizzati in questa dissertazione.

4.1-I cambiamenti osservati

4.1.1-L'innalzamento della temperatura media globale

La temperatura media globale è in continuo aumento sin dalla prima rivoluzione industriale ed ha raggiunto i picchi massimi nell'ultimo ventennio. A partire dal 2001, sono stati registrati diciotto tra i 19 anni più caldi a partire dal 1880. In particolare, si registra una variazione della temperatura media di 0,83° C nel 2018 riferito alla temperatura media del periodo 1951-1980. È necessario specificare che questo fenomeno non si è manifestato in maniera stazionaria né uniforme in tutto il globo terrestre.

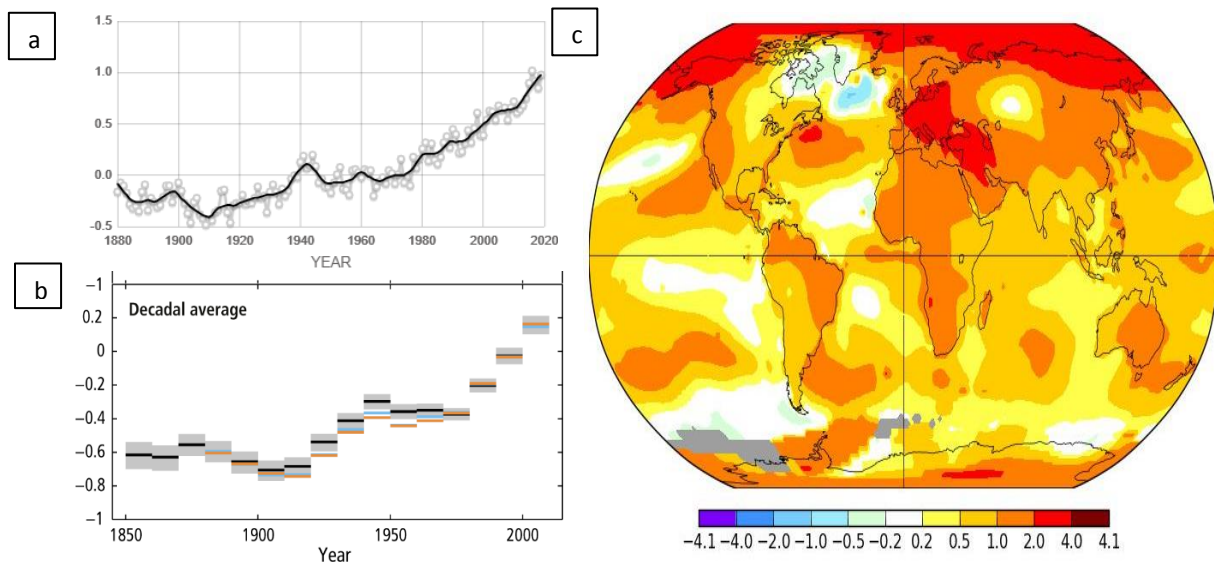


Figura 22: Anomalie della temperatura media globale osservata in °C. (a) Anomalia della temperatura media della superficie terrestre rispetto al valore medio valutato nel periodo 1951-1980. (b) Anomalie della media decennale della temperatura media globale rispetto alla media valutata tra 1986-2005. Anomalie nella temperatura media globale in °C. (c) Anomalie nella temperatura media globale nel 2018, espressa in gradi Celsius, riferita alla media del periodo 1951-1980. Le zone grigie sono le zone in cui si ha mancanza di dati sufficienti per applicare il metodo GISTEMP v4 descritto nelle pubblicazioni Hansen et al. (2010) and Lenssen et al. (2019) della NASA. **Fonte: (In alto a sinistra e destra) NASA/GISS; (In basso a sinistra) IPCC AR5**

Nel periodo compreso tra il 1850 ed il 1915, le fluttuazioni della temperatura media sono state causate principalmente dalla variabilità naturale intrinseca del sistema climatico. La temperatura media globale è, invece, aumentata significativamente tra il 1910 ed il 1940, periodo in cui si è assistito ad un aumento di 0,35°C. Dopo un breve periodo di raffreddamento, si è verificato un ulteriore innalzamento repentino sino a raggiungimento degli attuali 0,83°C (**Figura 22-a**).

Nell'emisfero nord sono state registrate anomalie delle temperature maggiori. Inoltre, i dati globali mostrano un surriscaldamento relativo maggiore sulla superficie terrestre rispetto che su quella oceanica, principalmente a causa della maggiore capacità termica dell'acqua rispetto alle rocce che costituiscono la terra (**Figura 22-c**).

I dati più recenti mostrano che sono stati registrati nuovi massimi storici della temperatura superficiale terrestre in Europa centrale, Asia, Australia, sud Africa, Madagascar, Nuova Zelanda, nord America e nella parte orientale del sud America. Analogamente a quanto accaduto per la superficie terrestre, i dati mostrano nuovi massimi in differenti zone oceaniche, incluse il nord ed il sud dell'Atlantico, la zona orientale dell'oceano Indiano e diverse aree del nord, del centro e del sud-ovest del Pacifico. Le uniche anomalie di raffreddamento registrato si sono verificate in nord

America, in cui si è verificato un inverno molto rigido che ha impattato sull'approvvigionamento di energia primaria di questa macroregione.

Le analisi recenti dei massimi e minimi delle temperature medie giornaliere mostrano una netta diminuzione di giorni e notti estremamente fredde a favore di giorni e notti estremamente caldi. I dati satellitari riportano che la troposfera si sia riscaldata con un tasso, addirittura, maggiore rispetto alla superficie terrestre; mentre la stratosfera si è raffreddata rimarcabilmente, fenomeno imputabile alla riduzione della ozonosfera. Questo fenomeno rafforza le conclusioni raggiunte dalla comunità scientifica circa l'incremento consistente dell'entità dell'effetto serra. I modelli climatici proiettano un ulteriore aumento della temperatura superficiale globale di 0,5°C rispetto alla media del periodo 1986-2005 per il 2020 [21] [4].

4.1.2-Lo scioglimento delle calotte polari

Al fine di comprendere i fenomeni relativi allo scioglimento dei ghiacciai, occorre riportare alcune caratteristiche peculiari del ciclo di vita di queste componenti della criosfera. Essi si formano alle altitudini e latitudini più elevate a causa di un processo di compattazione e ricristallizzazione della neve. Occorre, quindi, che la neve in queste zone sia perenne: ossia che la quantità accumulata in inverno sia maggiore di quella sciolta in estate. A causa sia del surriscaldamento superficiale terrestre che oceanico, questo ciclo stagionale è stato modificato, comportando ingenti perdite massicce nei ghiacciai monitorati.

I dati del satellite Grace mostrano che sia la calotta polare dell'Antartico che quella della Groenlandia, le due più grandi riserve di ghiacciai al mondo, continuano a perdere massa. Nel 2017, si è registrata una perdita di massa della calotta polare artica di 1870 (\pm 175) Gt, mentre in Groenlandia di 3771 (\pm 98) Gt, riferite ai valori dell'anno di riferimento 2002 (**Figura 23**).

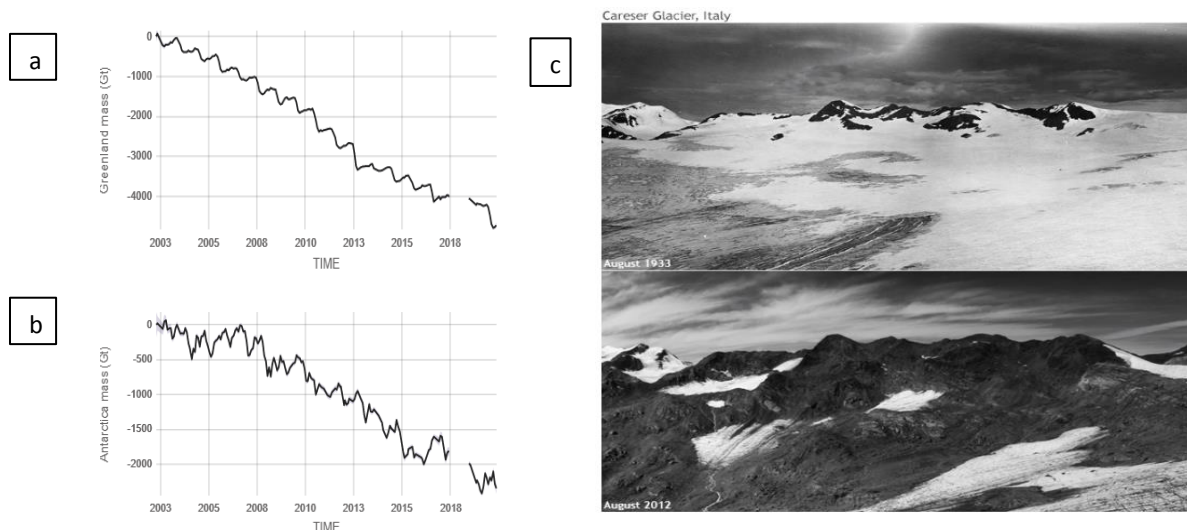


Figura 23: Evoluzione della perdita di massa dei ghiacciai. (a) Evoluzione della perdita di massa dei ghiacciai in Groenlandia espressa in Giga-tonnellate rispetto all'anno di riferimento 2002. (b) Evoluzione della perdita di massa dei ghiacciai in Antartide espressa in Giga-tonnellate rispetto all'anno di riferimento 2002. (c) Foto del ghiacciaio di Careser in Italia nell'Agosto del 1993 e nell'Agosto del 2012. **Fonte: (Sinistra) Climate.nasa.gov; (Destra) NOAA/NCEI**

Nel 2017, è stato riportato che i ghiacciai di riferimento⁴⁵ hanno perso circa 921 millimetri di acqua equivalente ed è stata stimata una perdita complessiva di 951 millimetri per i 142 ghiacciai esistenti. I dati preliminari del 2018 non sono affatto rassicuranti: si stima una perdita di 1247 millimetri di

⁴⁵ I ghiacciai di riferimento sono circa 42 e presentano un dataset di bilancio maggiore o uguale a trent'anni. Essi sono regolarmente seguiti e classificati dalla World Glacier Monitoring Service.

acqua equivalente per i ghiacciai di riferimento, valore che comporterebbe un nuovo record storico dall'anno di riferimento 2002.

Il tasso di perdita dei ghiacciai ha subito una crescita significativa negli ultimi cinquant'anni: esso è stato pari circa a -228 millimetri all'anno negli anni ottanta, -443 millimetri all'anno negli anni novanta, -676 millimetri all'anno nel primo decennio del millennio sino al raggiungimento del tasso attuale.

4.1.3-Lo scioglimento del Mar Glaciale Artico

La calotta glaciale artica è una distesa di acqua marina congelata che galleggia sulla cima dell'Oceano Artico e dei mari vicini. Ogni anno aumenta la propria massa ed estensione durante l'autunno e l'inverno, mentre si scioglie e si contrae durante la primavera e l'estate. Negli ultimi decenni, l'aumento delle temperature ha causato una marcata diminuzione delle estensioni e dello spessore del ghiaccio del mar Artico in tutte le stagioni, con riduzioni particolarmente rapide dell'estensione minima di ghiaccio a fine estate. Alcune ricostruzioni paleoclimatiche hanno dimostrato che questo tasso di diminuzione non ha precedenti storici simili negli scorsi 1500 anni.

I cambiamenti concernenti il Mar Artico hanno impatti di ampia portata su differenti componenti del sistema climatico. Essi, attraverso il fenomeno di desalinizzazione parziale oceanica e l'abbassamento del coefficiente di albedo terrestre, influenzano gli ecosistemi locali, i modelli meteorologici globali e la circolazione oceanica.

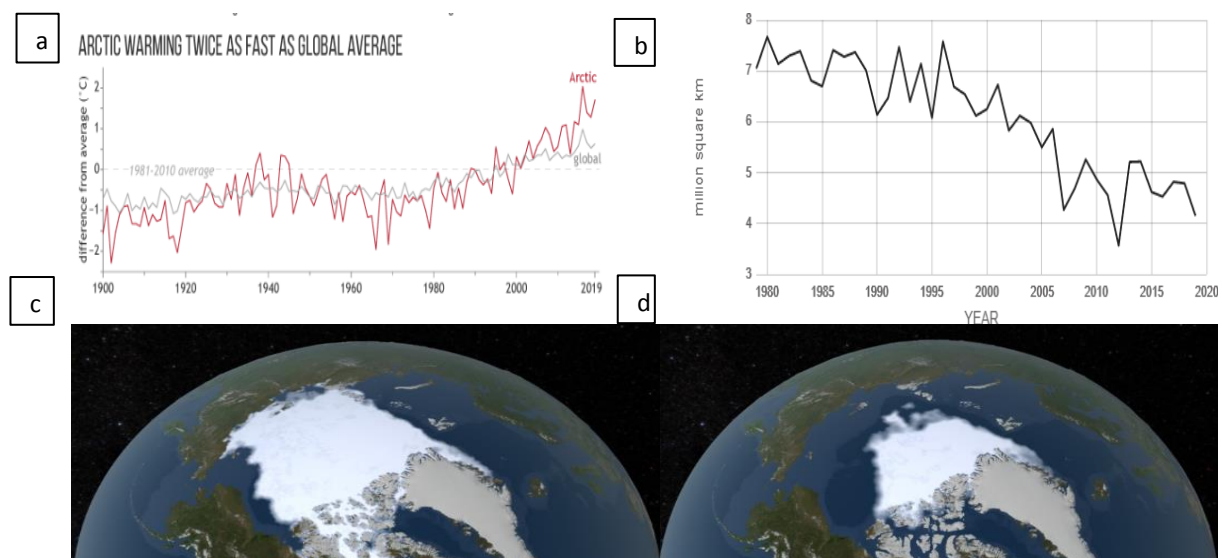


Figura 24: Tasso di incremento della temperatura. (a) Nel grafico viene effettuato un confronto tra il tasso di incremento di temperatura medio globale, in nero, e quello della regione artica, in rosso, rispetto al valore medio del periodo 1981-2010. Evoluzione dello scioglimento del mar glaciale artico. (b) In figura sono riportati milioni di chilometri quadrati in meno dell'estensione superficiale del mar glaciale artico. Si nota un trend decrescente significativo a partire dal 1998, tendenza che si è acuita negli ultimi dieci anni. (In basso) Si riporta una fotografia satellitare della regione artica nel 1979 (c) e nel 2019 (d). L'estensione superficiale è diminuita visibilmente in linea con i bilanci massicci effettuati dalla comunità scientifica. **Fonte: (in alto a sinistra ed in basso) NASA/GISS, (in alto a destra) NOAA/NCEI**

L'estensione superficiale ghiacciata del mar Glaciale Artico raggiunge il suo valore minimo ogni settembre. Questo parametro è influenzato dalla circolazione atmosferica, dalla temperatura media superficiale e dalla variazione del contenuto e della temperatura dei flussi massicci entranti nella regione artica. In particolare, si riporta che i flussi oceanici entranti dallo stretto di Fram presentano una temperatura media che è di circa 2°C maggiore rispetto ai valori del 1900.

Confrontando i valori minimi a partire dal 1979, se ne calcola una diminuzione relativa di 12,85 % per decade relativa al valore medio del periodo 1981-2010. Il 2019 è stato il secondo anno più caldo registrato nella regione artica: il tasso di incremento misurato risulta essere quasi doppio rispetto alla media globale [23] [21] [2].

4.1.4-L'innalzamento del livello del mare e l'acidificazione degli oceani

Il livello del mare misurato varia su un'ampia scala temporale e spaziale a causa dei fenomeni di variabilità naturale, quali maree o perturbazioni oceaniche e atmosferiche, e antropogeniche, trasformazione delle zone costiere e modifiche del ciclo idrogeologico. Per questa ragione, si è soliti a riferirsi a tre parametri differenti: media globale totale, media regionali ed eventi estremi associati a maree ed uragani.

Lo scioglimento dei ghiacciai e l'espansione termica dell'acqua hanno comportato un incremento del livello medio globale del mare di circa di 20 centimetri dal 1880. In particolar modo, le interazioni del sistema climatico con i ghiacciai possono comportare sia un contributo positivo, attraverso un flusso massiccio in ingresso associato al relativo processo di fusione, che negativo, attraverso il procedimento inverso causato un aumento degli eventi nevosi dovuti all'incremento dell'umidità relativa atmosferica. Il contributo netto nelle ultime due decadi è stato positivo, in linea con le misurazioni satellitari della regione artica e antartica.

L'oceano assorbe circa il 93% dello sbilancio radiativo totale causato dai forzanti climatici. L'assorbimento di questa energia ha comportato il surriscaldamento degli strati superficiali degli oceani. In particolare, è stato registrato un incremento medio decennale rispetto al periodo 1950-2016 pari a 0,11°C per l'oceano Indiano, 0,07°C per l'oceano Atlantico e 0,05°C per l'oceano Pacifico.

Contributors to global sea level rise (1993-2018)

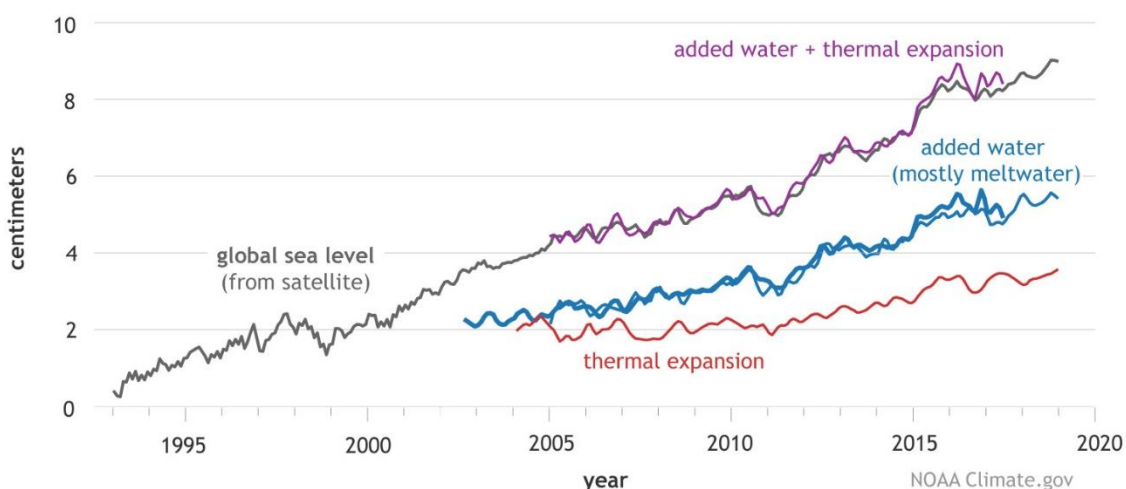


Figura 25: Contributi all'innalzamento del livello del mare. Livello del mare registrato dal satellite dal 1993 (linea nera), più stime indipendenti dei diversi contributi dell'aumento del livello del mare: espansione termica (in rosso) e quantità di acqua proveniente dallo scioglimento del ghiacciaio (in blu). Aggiunte insieme (linea viola), queste stime separate corrispondono molto bene al livello del mare osservato dal satellite. **Fonte: National Oceanic and Atmospheric Administration**

Analogamente ai cambi registrati negli altri indicatori climatici, queste trasformazioni non sono avvenute in maniera stazionaria: più di un terzo di questo incremento è stato registrato negli ultimi venticinque anni. Il tasso di incremento medio misurato tra il 2006 ed il 2015, pari a 3,6 millimetri all'anno, è stato circa due volte e mezzo maggiore del tasso riscontrato nella decade precedente.

Occorre, inoltre, specificare che questo fenomeno non è stato uniforme in tutto il globo terrestre a causa delle variabilità naturali e antropogeniche della circolazione atmosferica e oceanica.

Il livello del mare è misurato principalmente attraverso due strumenti: i mareografi ed i satelliti. Le stazioni di misurazioni oceaniche hanno raccolto dati sulle variazioni delle maree per più di un secolo attraverso sia strumenti manuali che digitali. Utilizzando sinergicamente questi dati, è stato possibile valutare delle medie globale ed effettuare aggiustamenti nel bias delle strumentazioni satellitari.

La composizione chimica dell'oceano è definita attraverso il suo livello di acidità, le concentrazioni di ossigeno, anidride carbonica e altri gas e ioni. I fenomeni naturali che modificano questi indici sono alcuni dei processi fondamentali del ciclo idrogeologico, quali precipitazioni, evaporazioni e contributo massiccio di ritorno dei fiumi, fenomeni legati alla circolazione oceanica e atmosferica, quali upwelling, uragani ed interazioni con gli ecosistemi marini. In particolar modo, si registra un incremento delle concentrazioni di anidride carbonica causate dall'assorbimento del 30% delle emissioni antropogeniche, il quale ha comportato la formazione di un acido diluito che, dissociandosi, acidifica gli oceani.

Il pH medio oceanico è diminuito di circa 0,1 dall'era preindustriale, cambiamento che non è stato mai registrato nelle ricostruzioni paleoclimatiche estese a più di due ere geologiche scorse. Questo fenomeno è più pronunciato nelle zone che presentano una temperatura atmosferica minore, a causa dell'incremento del fenomeno di upwelling che riporta in superficie flussi ricchi di anidride carbonica.

La concentrazione di ossigeno varia in funzione della latitudine e della profondità oceanica: essa è maggiore nelle regioni polari, mentre è minore nei bacini orientali più bassi dell'oceano Pacifico ed Atlantico. L'aumento della temperatura dello strato superficiale dell'oceano ne ha ridotto l'abbondanza relativa del 2% rispetto i valori del 1960 come risultato di diversi feedback climatici tra cui l'acidificazione stessa, le perturbazioni della circolazione oceanica ed atmosferica.

La salinità oceanica continua a variare in funzione dei differenti driver climatici che danno un contributo maggiore. Negli oceani nordici e negli artici, si sta registrando una parziale desalinizzazione a causa del contributo massiccio correlato allo scioglimento dei ghiacciai; mentre, a latitudini minori e nell'emisfero sud, si registra un aumento di salinità, dovuto alle temperature superficiali maggiori e all'aumento della frequenza delle precipitazioni. La variazione della salinità introduce una perturbazione all'intera circolazione oceanica a causa delle modifiche del moto termoalino, che ha subito una diminuzione di velocità correlata alle emissioni antropogeniche [24] [2] [21] [25].

4.1.5- Intensificazione delle precipitazioni e di eventi estremi

I cambiamenti osservati sulle modifiche del ciclo dell'acqua presentano un livello di incertezza maggiore a causa delle difficoltà nella misurazione di questi processi micro-scala e la sostanziale mancanza di datasets sufficientemente ampi.

Per quanto concerne le precipitazioni sulle medie latitudini dell'emisfero nord, è possibile affermare, quasi con certezza, che vi sia stato un incremento relativo delle precipitazioni in frequenza ed intensità. Mentre, per quanto riguarda le altre latitudini, la mancanza e l'elevata incongruenza tra i differenti dati, non permette di raggiungere conclusioni scientifiche appropriate.

È possibile affermare, con un relativo grado di incertezza, che le emissioni di gas serra abbiano influito sull'aumento e la diminuzione regionale di onde di siccità. Esistono tre tipologie differenti di siccità caratterizzate da un deficit di acqua nei diversi componenti climatici. La siccità meteorologica,

caratterizzata dalla condizione di mancanza di precipitazioni, e la siccità idrogeologica, correlata alla secchezza dei fiumi e dei laghi, possono essere imputate alle modifiche del bilancio massico del ciclo idrogeologico dell'acqua. La siccità agricola descrive, invece, la mancanza di umidità nel suolo e può essere imputata alla variazione netta d'uso territoriale.

Non è possibile apprezzare, globalmente, significative variazioni nella verifica di onde di siccità; mentre è possibile riportare grosse modifiche dal punto di vista regionale. In particolare, si è registrato un aumento di onde di siccità nel Mediterraneo e nell'Africa orientale, mentre una diminuzione relativa nella parte centrale del nord America e nel nord-occidente dell'Australia [26].

4.2-I modelli climatici computazionali

4.2.1-Introduzione al concetto di modello climatico

In generale, un modello climatico può essere definito come una rappresentazione matematica del sistema climatico basato su principi fisici, chimici, biologici e la parametrizzazione e approssimazione di effetti micro-scala⁴⁶.

Le equazioni di conservazione dell'energia, della massa e del momento sono così complesse e interconnesse che occorre risolverle numericamente. Ne consegue che le soluzioni ottenute saranno sempre discrete nello spazio e nel tempo e che, quindi, si tratta di valori medi per superfici che dipendono dalla risoluzione spaziale e temporale adottata.

La griglia numerica adottata non è in grado di rappresentare effetti micro-scala sia a causa di una mancata comprensione della fisica dettagliata del processo che dell'eccessivo costo computazionale che ne conseguirebbe. Per questa ragione, si effettua un processo di parametrizzazione, basato su risultati empirici e teorici, da implementare al modello in macro-scala. Queste implementazioni riproducono solo gli effetti del primo ordine e non sono solite essere valide per tutte le possibili condizioni.

Le proiezioni climatiche vengono effettuate per differenti tipologie di scenario o obiettivi futuri che includono le principali interazioni tra fattori socioeconomici, energetici e ambientali.

4.2.2- Le differenti tipologie di modello climatico

I modelli climatici possono essere classificati in funzione delle componenti che vengono rappresentate in modo interattivo. A causa della scarsa comprensione della fisica di alcuni processi e gli elevati costi computazionali, alcune componenti vengono definite costanti anziché variabili matematiche.

La maggior parte dei modelli climatici presenta, perlomeno, il comportamento fisico dell'atmosfera, degli oceani e della criosfera. I più completi, gli Earth-System Models, includono il ciclo carbonioso, le dinamiche stagionali della vegetazione e della criosfera e la chimica atmosferica.

⁴⁶ I processi micro-scala di riferimento sono turbolenze atmosferiche e oceaniche, tempeste e la microfisica dei processi nuvolosi.

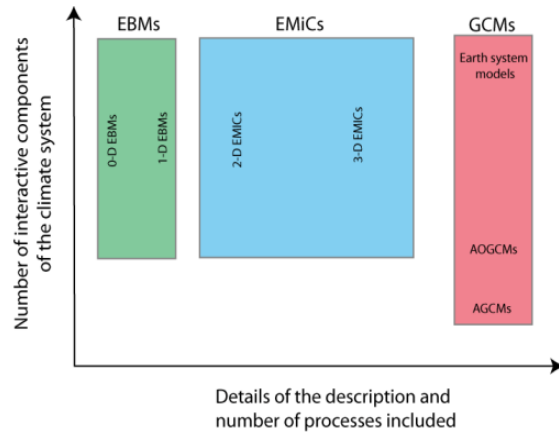
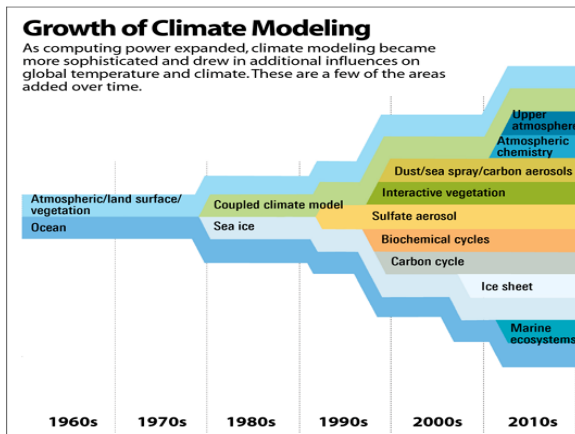


Figura 26: L'evoluzione dei modelli climatici (sinistra). All'aumentare del potere computazionale, i modelli sono diventati più sofisticati e differenti aree sono state aggiunte nel corso dei decenni. Schematizzazione delle componenti e processi inclusi nei diversi modelli (destra). Sulle ordinate vengono riportate il numero dei componenti interattivi inclusi nei modelli, mentre sulle ascisse la minuziosità dei processi descritti. **Fonte: University Corporation for Atmospheric Research- UCAR (sinistra); Université Catholique de Louvain, *Introduction to climate dynamics and climate modelling* (destra)**

Un altro modo di classificare i modelli è basato sulla complessità dei processi inclusi nelle simulazioni. I modelli climatici semplici sono una versione molto semplificata del sistema climatico reale. Le variabili sono mediate per intervalli spaziali molto grandi dell'ordine delle nazioni o dei continenti e molti dei processi di feedback non sono inclusi direttamente, ma solo attraverso la parametrizzazione.

I modelli più completi, i General Circulation Models, includono la struttura tridimensionale delle correnti oceaniche e dei venti. I costi computazionali sono molto più elevati e i risultati ottenuti presentano dei rumori dovuti alla variabilità del sistema climatico.

Infine, vengono introdotti dei modelli di complessità intermedia, gli Earth Models of Intermediate Complexity. Essi sono basati su una rappresentazione più complessa e risolta dei modelli semplici, ma includono parametrizzazione e semplificazioni rispetto ai GCM.

4.2.3-L'incertezza nei modelli climatici

Le incertezze relative alle tempistiche e all'entità del cambio climatico dipendono da fattori correlati alle scelte politiche umane, alla variabilità naturale e all'incertezza scientifica, associata sia alla modellazione che alla sensibilità climatica.

Le incertezze scientifiche sono legate alla parametrizzazione dei processi micro-scala e alla mancata conoscenza della totalità dei processi fisici ed i relativi feedback che avvengono all'interno del sistema climatico.

La sensibilità climatica, valore compreso tra 1,5 e 4,5°C secondo AR5, introduce degli errori sulle proiezioni dell'entità dei feedback climatici. Quali di queste incertezze sia più importante dipende dall'intervallo temporale considerato e dalla variabile considerata [27].

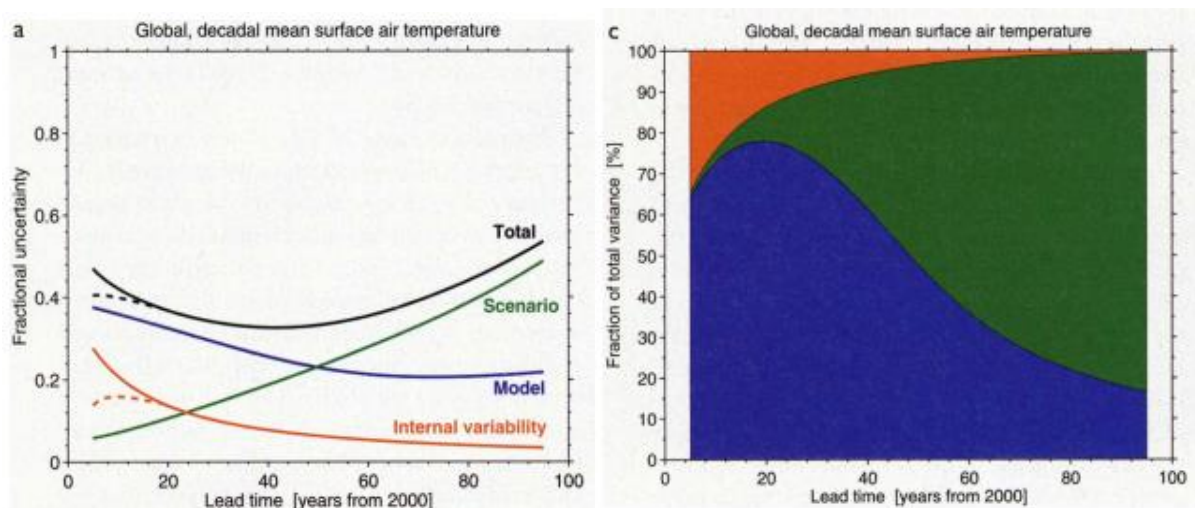


Figura 27: Incertezza relativa alla temperatura media decennale superficiale globale. In verde l'incertezza correlata allo scenario, in blu quella legata allo scenario, mentre in arancione l'incertezza relativa alla variabilità interna del sistema climatico. L'importanza relativa di ogni fonte di incertezza è mostrata dalla frazione di incertezza, valutata come il rapporto tra un livello di confidenza del 90% e la previsione media. La frazione percentuale della varianza totale è valutata come il rapporto tra la varianza associata alla singola incertezza e la varianza totale. **Fonte: Ed Hawkins, Rowan Sutton, *The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions, 2009***

4.3-JAVA CLIMATE MODEL

4.3.1-Introduzione a Java Climate Model

Java climate model (JCM) è un codice open-source che presenta un'interfaccia interattiva sul web finalizzata a sensibilizzare la popolazione mondiale sulle tematiche ambientali. Occorre specificare che non si tratta di un visualizzatore di dati, ma di un modello climatico semplificato completo. Tutti i calcoli computazionali avvengono in un unico loop temporale, quindi è risultato semplice implementare i cicli biogeochimici e le interazioni di questi con il sistema climatico.

Il modello presenta, analogamente ai modelli semplificati dell'IPCC utilizzati in AR4, alcuni problemi circa l'aggiustamento dell'emissioni secondo i trend di temperatura più recenti. Questa scarsa risposta introduce delle oscillazioni, le quali possono essere amplificate della comprensione incompleta dell'effetto di raffreddamento degli aerosol atmosferici.

Al fine di aumentare la credibilità di questo modello globale, il nucleo di calcolo, che implementa differenti modelli semplificati, è stato calibrato attraverso i risultati dei modelli più complessi GCMs. Nonostante si tratti di blocchi concettualmente semplici, è stato necessario sviluppare un metodo di calcolo autovettoriale-matriciale per ottenere una risposta istantanea (*Approfondimenti nel paragrafo 4.3.3*)

4.3.2- I blocchi di JCM ed il modulo *electricity generation*

JCM6 è programmato utilizzando Netbeans ed include vari scripts in XML per la compilazione e l'organizzazione del codice. La struttura, che dipende strettamente dal linguaggio orientato agli oggetti, è costituita da tre blocchi fondamentali: il modulo scientifico, al cui interno sono presenti tutte le variabili e costanti dei processi climatici; il modulo di calcolo, in cui sono presenti i codici di calcolo fondamentali e le parametrizzazioni; il modulo grafico, in cui vengono modificati e, successivamente, ristampati i grafici.

I modelli climatici utilizzati per valutare gli indici del cambiamento climatico sono il Bern Model ed il Wigley/Raper Upwelling-diffusion Energy model. Il primo è utilizzato per il calcolo del ciclo

carbonioso, la chimica atmosferica ed i forzanti radiativi; mentre il secondo permette la valutazione della temperatura media superficiale e l'incremento del livello del mare.

Entrambi i modelli incorporano un modello oceanico multistrato con un'area di riferimento dipendente dalla profondità media valutata per la regione in analisi. Come già anticipato nel paragrafo precedente, i sistemi sono risolti attraverso un metodo auto-vettoriale che risulta essere più rapido della integrazione diretta e più flessibile della funzione di risposta impulsiva del segnale.

Al fine di valutare l'evoluzione del settore di produzione di potenza e delle relative di emissioni al 2050, è stato utilizzato il modulo di calcolo *Electricity Generation* di JCM. A differenza dei modelli di ottimizzazione intertemporale, il codice di calcolo relativo a questo modulo assume che i decisori politici non effettuino programmi lungimiranti. In particolare, gli investimenti in nuove capacità dipendono unicamente dai benefici economici anticipati valutati in relazione alla domanda e all'approvvigionamento istantanei.

Sebbene la semplificazione effettuata non permetta l'allocazione dei risparmi e dei consumi economici futuri relativi al mondo dell'energia, essa garantisce una mappatura ed una modellazione delle interazioni tra parco elettrico e fattori socioeconomici ed energetici più realistiche. Come si può intuire facilmente, il più grande svantaggio dell'adozione di questo modello è rappresentato dall'eccessivo effetto forzante degli input nei primi anni delle simulazioni.

4.3.3-Il metodo auto-vettoriale

Gli auto-vettori e le matrici inverse sono calcolati utilizzando il pacchetto Java Matrix (JAMA), sviluppato al Massachusetts Institute of Technology. Si riporta una breve dimostrazione matematica che chiarisce in che cosa consista il metodo adottato. Consideriamo una semplice equazione differenziale:

$$\frac{dq}{dt} = -\lambda * q + x \quad (4.1)$$

Se x cambia linearmente da x_t a x_{t+dt} , può essere dimostrato che:

$$q_t + d_t = prop q_t + step x_t + ramp (x_{t+dt} - x_t) \quad (4.2)$$

Dove:

$$prop = e^{-\lambda dt} \quad (4.3)$$

$$step = \frac{(1 - prop)}{\lambda} \quad (4.4)$$

$$ramp = \frac{(dt - step)}{(\lambda * dt)} \quad (4.5)$$

Un sistema con n -componenti, caratterizzato da un interscambio di flussi diffusivi ed ulteriori input non lineari, può essere scritto:

$$\frac{dQ}{dt} = R Q + X \quad (4.6)$$

Dove Q è il vettore che descrive il contenuto dei componenti, R è una matrice per i flussi e X è il vettore contenente gli extra-input. È possibile diagonalizzare R :

$$R = S \text{diag}(E) S^{-1} \quad (4.7)$$

Dove S è la matrice degli autovettori e $\text{diag}(E)$ è la matrice diagonale degli autovalori.

Premoltiplicando tutto per la matrice S^{-1} , si riesce ad ottenere:

$$\frac{d(S^{-1}Q)}{dt} = \text{diag}(E) (S^{-1}Q) + S^{-1}X \quad (4.8)$$

$S^{-1}Q$ e $S^{-1}X$ sono dei semplici vettori: ogni elemento di $S^{-1}Q$ è moltiplicato da un solo autovalore e $\text{diag}(E)$ fornisce il termine λ .

Se si hanno molti intervalli di tempo infinitesimali uguali, è possibile calcolare le n-funzioni prop, step e ramp. Se il contenuto degli n-componenti è conservato nella forma $S^{-1}Q$, è possibile valutare la diffusione per ogni intervallo di tempo moltiplicando ogni elemento per la propria funzione prop.

Per aggiungere la funzione step e ramp per definire gli extra-input, occorre calcolare $S^{-1}X$. In particolare, se si hanno solo y-componenti con input non lineari, occorre moltiplicare solo le y-colonne della matrice nxn della matrice S^{-1} .

Al fine di plottare i risultati, occorre riconvertire $S^{-1}Q$ a Q premoltiplicando S. Se è necessario, però, effettuare solo il plot di z-elementi di Q, sarà necessario moltiplicare solo le z-righe della matrice S. Considerando, quindi, un numero di step temporali pari a t, è possibile affermare che il costo computazionale sarà pari a:

$$\text{costi comp.} = t * n * (1 + 2 * y + z) \quad (4.8)$$

In cui figura il fattore moltiplicativo due sulle y, perché abbiamo sia le moltiplicazioni relative alle funzioni step che a quelle ramp. Le funzioni di risposta impulsiva sono derivate attraverso lo stesso principio. L'unica differenza risiede nel fatto che X_t deve essere calcolato per ogni step temporale. Ne consegue che il costo computazionale è proporzionale al quadrato del numero di step temporali considerati.

CAPITOLO 5- IL NUCLEARE

5.0-Panoramica

In questo capitolo si riporta una descrizione della situazione corrente del nucleare in termini di generazione elettrica, condizioni di mercato del combustibile e condizioni operative della flotta internazionale. In particolare, si rimarca la necessità di eseguire processi di implementazione della vita media e di nuovi investimenti a causa dell'imminente pensionamento di buona parte della capacità attualmente installata. Inoltre, si discutono le sfide future che occorre vincere al fine di garantire una maggiore penetrazione di questa tecnologia nel parco elettrico mondiale, quali una maggiore sicurezza, la disposizione e lo smaltimento definitivo dei rifiuti altamente radioattivi e costi di generazione futuri minori.

5.1-La situazione attuale del nucleare

5.1.1-La generazione elettrica totale

Il nucleare è la seconda fonte di produzione di potenza a basse emissioni più grande al mondo, preceduta solamente dall'idroelettrico. La flotta globale è costituita da 452 reattori operanti che hanno prodotto circa 2700 TWh della generazione globale, attestando uno share complessivo pari al 10%. Nei paesi OECD, lo share del nucleare è stato maggiore ed ha contribuito al 18% della generazione elettrica.

Nonostante negli ultimi 50 anni il nucleare abbia contribuito all'abbattimento di più di 60 Gt di anidride carbonica, i recenti accaduti di Fukushima hanno impattato gravemente sull'opinione pubblica e politica di questa fonte, nonché sugli investimenti ed il ricorso a questa opzione. Gli scenari di sviluppo sostenibile della International Energy Agency hanno evidenziato sia la necessità di incrementare l'efficienza e la penetrazione delle rinnovabili che la potenza prodotta da nucleare [8].

Nel 2018, la capacità netta massima dei reattori operanti è stata di 402 GWe, mentre a fine anno si è registrata una capacità annuale complessiva pari a 397 GWe. La generazione nucleare è aumentata in Asia, est Europa e Russia, Nord America e Sud America (**Figura 28**). La flotta nucleare attuale è costituita principalmente da reattori Pressurized Water Reactor, che costituiscono circa il 67% del complessivo, seguiti dai Boiling Water Reactor al 16%, i Pressurized Heavy Water Reactor all'11% e la restante parte è suddivisa tra Fast Neutron Reactor, Gas Cooled Reactor e Light Water Graphite Reactor.

Per quanto concerne le prestazioni operative globali, il fattore di capacità medio, basato solo sull'analisi dei reattori operativi, è stato pari a 79,8 %, registrando una diminuzione rispetto all'81,1% del 2017. L'elevato fattore di capacità è, indubbiamente, indice di prestazioni operazionali ottime, sebbene occorra specificare che ciò risulta essere vero solo per strategie operazioni basate su una modulazione dell'output elettrico costante [28].

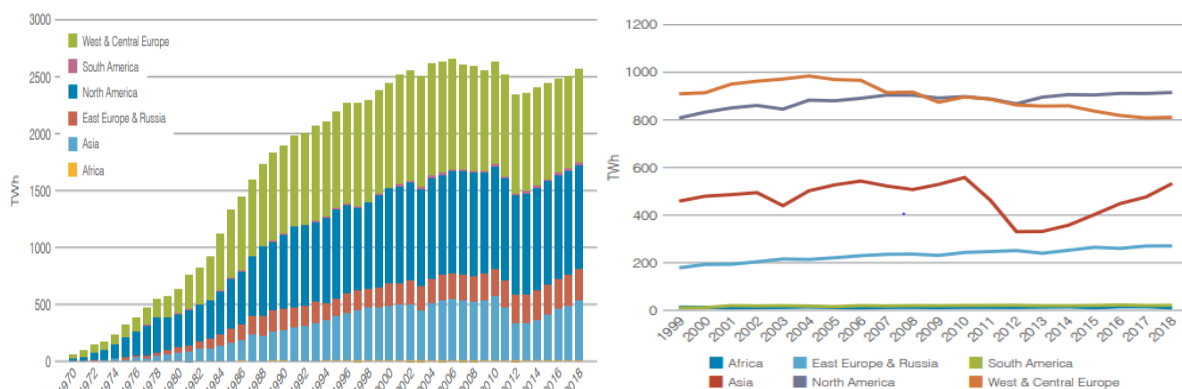


Figura 28: Evolutione della generazione elettrica continentale da fonte nucleare. (Sinistra) Energia elettrica totale prodotta dal 1970 al 2018 nei differenti continenti. (Destra) Evoluzione dell'energia elettrica nel tempo di ogni singolo continente. Fonte: <https://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>

5.1.2- Il mercato dell'uranio

Le spese di esplorazione e produzione dell'uranio sono diminuite da più di due miliardi di dollari nel 2014 a circa 663-678 milioni di dollari nel 2016. Questa diminuzione è stata causata dalla depressione economica che ha subito questa fonte energetica successivamente agli accaduti del 2011. In particolar modo, si sono registrate grosse variazioni degli investimenti di esplorazione e produzione

nelle miniere di Cigar Lake, in Canada, nella miniera di Husab, in Namibia, in Repubblica Ceca, in Russia, negli Stati Uniti ed in Cina.

La produzione globale di uranio ha raggiunto le 53100 tonnellate, registrando una diminuzione del 10% rispetto al 2017. Nei differenti paesi OECD, la produzione è diminuita significativamente ed è, di conseguenza, aumentata la dipendenza da importazioni per alimentare la flotta nucleare esistente.

In aggiunta alla diminuzione di produzione primaria, si è verificata una diminuzione in tutti i settori secondari correlati a questa fonte, quali industrie di arricchimento, immagazzinamento e processamento di uranio primario. Diversi impianti di arricchimento hanno sostituito le vecchie centrifughe con nuove più efficienti, al fine di compensare le perdite correlate alla diminuzione di richieste di processamento globale.

A causa delle condizioni di mercato elettrico soprassaturo in diversi paesi altamente dipendenti da nucleare, come Francia o Stati Uniti, diversi impianti hanno funzionato a carico variabile, registrando fattori di capacità relativamente bassi, approssimativamente 50-70%.

Le risorse non convenzionali di uranio rappresentano un'altra risorsa potenziale nell'approvvigionamento futuro. Le riserve attualmente contabilizzate sono circa di 28,5 milioni di tonnellate. Occorre specificare che in Australia, Canada e Stati Uniti i report riguardanti queste riserve non sono state aggiornate da diversi anni [29].

5.1.3 Informazioni sugli impianti nucleari attuali

All'inizio del 2019, nei paesi NEA, sono stati registrati 348 reattori operativi e 23 reattori in costruzione, di cui 3 temporaneamente sospesi in Giappone. Inoltre, si sta discutendo la costruzione di altri 10 reattori, tra cui si annoverano i primi reattori per il settore commerciale in Turchia, ed il pensionamento di 27 reattori nel 2023 nei paesi OECD, i quali comporterebbero una perdita di capacità pari a 25 GWe. Tra questi sono inclusi i reattori che verranno chiusi in Germania, in linea con la programmazione dell'eliminazione graduale di questa fonte fino al 2022. Di seguito, si riporta la situazione attuale in diversi paesi NEA:

- In Argentina, il Candu 6 di Embalse è ritornato in servizio a gennaio, dopo aver subito un rifornimento ed una ristrutturazione completa che ne garantirà il funzionamento per altri 30 anni. Inoltre, l'impianto Atucha 1 ha ricevuto un'implementazione di vita media che ne comporterà il funzionamento sino ai 50 anni.
- In Belgio, il governo ha deciso di costruire una nuova infrastruttura di ricerca, la Multipurpose Hybrid Research Reactor for High Tech Applications, per indagare le trasmutazioni dei rifiuti altamente radioattivi e nuove tecnologie per la produzione di radionuclidi medici.
- In Canada, la ristrutturazione dell'impianto di Darlington, causerà un lungo stop di almeno 10 anni. Inoltre, la Canadian Nuclear Safety Commission ha approvato il progetto di allungare le operazioni dell'impianto di Pickering per altri quattro anni. Nello stesso anno, la commissione Natural Resources Canada ha iniziato il processo di appalto e sviluppo di potenziali progetti futuri circa l'installazione di small modular reactors.
- In Repubblica Ceca, il governo sta discutendo l'ampliamento dell'industria nucleare. In particolare, sono iniziate le negoziazioni per valutare un sito costruttivo preferenziale.
- In Finlandia, il governo ha garantito la licenza operativa per l'utilizzo dell'impianto Olkiluoto 1 e 2, per altri 20 anni, e ha dato il via alle operazioni di avviamento nell'unità 3. Sono, inoltre, cominciati i lavori nell'impianto di Pyhäjoki, sebbene, a causa delle nuove decisioni governative sulle costruzioni di nuovi impianti nucleare, vi sarà uno stop sino al 2028.

- In Francia, gli impianti della Électricité de France stanno subendo diverse implementazioni di allungamento di vita oltre i 40 anni in attesa di un'approvazione regolatoria nel 2020. La costruzione dell'EPR di Flamanville è continuata nel 2018, sebbene siano stati annunciati ulteriori ritardi. Inoltre, alcuni test sull'invecchiamento termico hanno definito un limite massimo di utilizzo sino al 2024.
- In Giappone, è stato approvato il riavvio di 16 reattori nucleari nel 2019, sebbene, infine, ne abbiano funzionato solo 9. Il tasso di riavvio è strettamente correlato al consenso pubblico e alla regolazione giuridica di queste fonti.
- In Corea, il governo sta discutendo i progetti dei nuovi reattori in costruzione a Shin-Kori. Le ammissioni del nuovo presidente eletto circa l'eliminazione graduale del nucleare al 2045 non chiariscono la posizione del governo in merito agli sviluppi di queste due nuove unità.
- Nel 2018, in Russia, è stato costruito il secondo, il primo fu lo Sturgis americano, impianto nucleare galleggiante. L'impianto è stato collegato nella rete lo scorso dicembre. Inoltre, nello stesso anno, sono stati collegati alla rete altri due impianti.
- In Slovenia, il governo ha preparato una bozza delle politiche energetiche che il paese intraprenderà a breve. In particolare, si prevede che l'impianto di Krško sarà operativo sino al 2043, salvo future complicazioni.
- Il governo spagnolo ha annunciato che non ha intenzione di implementare la vita media dei reattori nucleari esistenti oltre i 40 anni.
- Nel 2018, sono iniziati i lavori di costruzione del primo impianto ad Akkuyu in Turchia. Si sta discutendo la possibile installazione di una seconda unità nello stesso sito.
- All'inizio del 2019, sono iniziati i lavori di costruzione della prima unità dell'impianto di Hinkley Point C. Nel novembre del 2018, Toshiba ha annunciato di abbandonare il progetto nucleare NuGen, la cui costruzione era programmata a Moorside. Il governo sta discutendo la possibilità di progettare, quindi, la costruzione dei più avanzati small modular reactor.
- Nonostante la costruzione delle unità 3 e 4 di Vogtle, negli Stati Uniti, si sia protratta per tutto il 2018, è stato riportato che vi sarà un ulteriore ritardo sino al 2022. Inoltre, il governo ha garantito la licenza per l'implementazione di altri vent'anni di vita di funzionamento per 89 dei 96 reattori della flotta americana [30].

5.1.4- Il pensionamento degli impianti nucleari

In assenza di nuovi progetti ed estensioni della vita media degli impianti nucleari attuali, le emissioni di anidride carbonica annuali potrebbero aumentare di circa 4 GtCO₂. La flotta di reattori delle economie emergenti, quali Cina e India, produrrà elettricità a basse emissioni per le decadi a seguire senza particolari intoppi; mentre la flotta nucleare delle economie più avanzate, quali Stati Uniti, Unione Europea e Giappone, ha una vita media di circa 35 anni e si prospetta una diminuzione della capacità attuale del 25% al 2025.

A causa della recessione economica che sta subendo questa tecnologia, risulta essere molto più vantaggioso estendere la vita media di un impianto attraverso processi di ristrutturazione e riqualificazione piuttosto che costruire nuovi impianti. Il costo stimato di un'estensione di vita media di 10 anni per ogni GW di capacità installata varia dai 0,5 ad 1 G\$, range che dipende dalle condizioni effettive del sito in analisi.

Le condizioni soprassature del mercato elettrico e gli elevati costi di investimento di queste operazioni di implementazione della vita media possono minare l'effettivo ricorso al nucleare negli anni a seguire, aumentando le difficoltà correlate all'attuazione della transizione energetica globale.

In questo caso, la capacità nucleare delle economie avanzate diminuirebbe di circa due terzi al 2040, passando dai circa 280 GW attuali ai 90 GW di capacità installata. In particolare modo, il contributo del nucleare raggiungerebbe il 4% in Unione Europea, l'8% negli Stati Uniti ed il 2% in Giappone.

Il pensionamento anticipato di questi impianti introdurrebbe diverse problematiche correlate alla sicurezza di approvvigionamento e stabilità della rete, causando un maggior ricorso agli impianti a gas e, quindi, a maggiori investimenti in questo settore. Nello specifico, si stima che siano necessari circa 1600 G\$ di ulteriori investimenti nelle prossime due decadi per realizzare la sostituzione parziale di questi impianti [31].

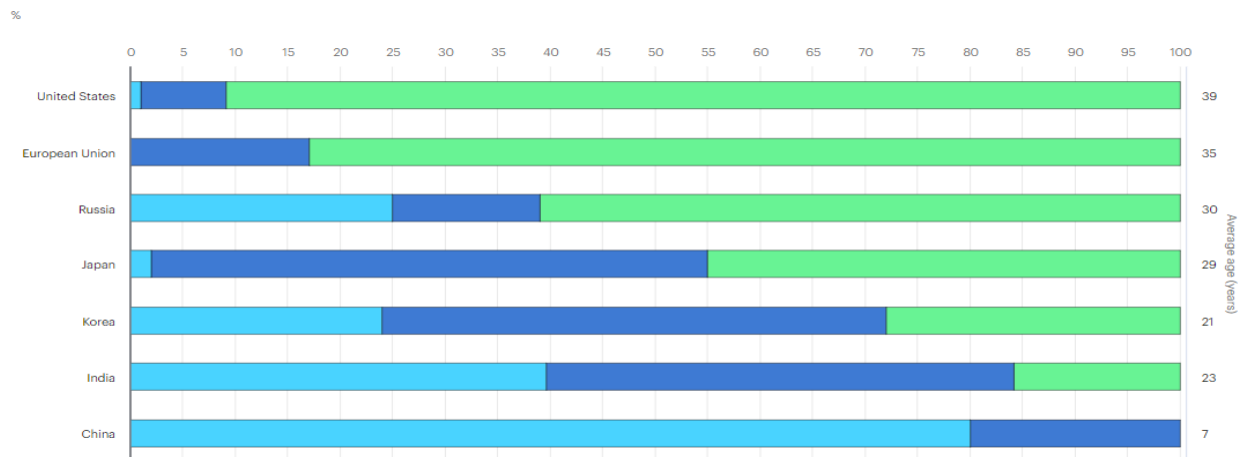


Figura 29: Vita media della flotta nucleare di diversi paesi. In questo grafico viene riportata la vita media della flotta nucleare di diversi stati. In azzurro, gli impianti che presentano una vita media minore di 10 anni; in blu, gli impianti che presentano una vita media compresa tra 10 e 30 anni; in verde, gli impianti che presentano una vita media maggiore di 30 anni.

5.2 Le sfide future

5.2.1-Sicurezza

La principale sfida futura che occorre risolvere al fine di garantire una maggiore penetrazione del nucleare nel parco elettrico internazionale è, indubbiamente, correlata alla sicurezza di questa tecnologia. Nonostante l'industria nucleare sia severamente regolata e si segua un protocollo di protezione multilivello, la pericolosità degli incidenti comporta un impatto significativo sull'opinione pubblica circa l'utilizzo di questa risorsa.

Gli incidenti nucleari più gravi coinvolgono la fusione del nocciolo del reattore a seguito di un surriscaldamento non compensato dai sistemi di raffreddamento. Questo fenomeno può essere causato da perdita di refrigerante, perdite di pressione del refrigerante, portate massiche non adeguate o da un'escursione critica delle operazioni dei reattori ed il conseguente raggiungimento di un livello di potenza maggiore di quello nominale.

Al fine di evitare la dispersione di sostanze radioattive in atmosfera, l'industria nucleare adotta un approccio di difesa in profondità. Questa metodologia di difesa consiste nell'utilizzo gerarchico di differenti livelli di sistemi e procedure al fine di mantenere l'efficacia delle barriere fisiche tra materiale radioattivo e lavoratori, popolazione e ambiente esterno. Essa è implementata nelle fasi di progettazione e costruzione per fornire una protezione più ampia durante i transitori programmati, gli incidenti ed i rischi associati ad errori umani ed eventi estremi esterni. Per un'effettiva implementazione di queste misure di sicurezza, occorre analizzare i rischi associati alla quantità e alla

tipologia di materiale radioattivo utilizzato, nonché alla natura chimica e fisica dei prodotti di fissione.

La difesa in profondità è generalmente articolata in multilivelli, in cui si enfatizzano gli aspetti correlati alla prevenzione, protezione e mitigazione. In particolare modo, il concetto di prevenzione è basato sulla minimizzazione delle cause di incidenti e malfunzionamenti. Le tecniche più comuni includono la progettazione di un reattore con caratteristiche di sicurezza intrinseca, come un coefficiente di reattività negativo, l'utilizzo di materiali chimicamente compatibili nel nucleo del reattore, sicurezza della qualità di manifattura e costruzione e, infine, una maggiore formazione e preparazione del personale.

La protezione è basata su sistemi di controllo e monitoraggio delle condizioni operative dell'impianto, quali pressione, portata, temperatura, potenza e livello radiativo, e sistemi di riconoscimento di transitorio e scostamento dalle operazioni stazionarie.

Infine, la mitigazione è basata sulla limitazione degli impatti degli incidenti attraverso sistemi di sicurezza ingegneristico, piani di emergenza ed evacuazione.

Per quanto concerne le barriere fisiche effettive, ve ne sono differenti tra la sorgente radioattiva, ossia il combustibile ed i prodotti di fissione, e l'ambiente esterno. Le più importanti sono il pellet di combustibile, il rivestimento del combustibile, i confini del sistema di raffreddamento ed il contenitore primario [32].

5.2.2- Smaltimento e disposizione dei rifiuti

I rifiuti radioattivi includono tutti i materiali, che sono intrinsecamente radioattivi o che sono stati contaminati da radiazioni, di cui non si prevede un ulteriore utilizzo. Ogni governo decide se alcuni materiali, come combustibile usato o plutonio, debbano essere classificati come rifiuti.

Ogni radionuclide è caratterizzato dalla propria emivita, ossia la quantità di tempo affinché metà degli atomi che lo costituiscono decada e, quindi, esso perda metà del proprio livello di radioattività. I radionuclidi che presentano un'emivita elevata sono emettitori alfa o beta, mentre quelli con vita media breve tendono ad emettere particelle gamma. I rifiuti radioattivi sono classificati in differenti categorie in funzione del livello di attività: basso, medio e alto.

I rifiuti a bassa attività hanno un contenuto radioattivo che non supera i 4 Giga-Becquerels/ton di attività alfa o 12 Giga-Becquerels/ton di attività beta-gamma. Essi non richiedono particolari sistemi protettivi durante il trasporto e la disposizione, che spesso avviene in infrastrutture in superficie. Inoltre, essi costituiscono circa il 90% in volume dei rifiuti totali, ma solo l'1% della radioattività totale. Al fine di ridurre il volume, vengono spesso compattati o inceneriti.

Nonostante i rifiuti ad attività intermedia presentino un calore di decadimento massimo pari a 2 kW/m³, non vengono prese in considerazione la progettazione e la costruzione di appositi accumuli. A differenza dei rifiuti a bassa attività, sono necessarie delle misure protettive durante la disposizione ed il trasporto. Essi costituiscono circa il 7% del volume totale e contengono solo il 4% della radioattività complessiva. Gli oggetti più piccoli e alcuni fluidi possono essere solidificati in bitume o calcestruzzo.

I rifiuti altamente radioattivi presentano un calore di decadimento maggiore dei rifiuti ad attività intermedia, che comporta un aumento significativo della propria temperatura e di quella dell'ambiente di disposizione finale. Ne consegue, quindi, che per la disposizione e lo smaltimento di questi rifiuti occorra un sistema di protezione e raffreddamento. Nonostante essi costituiscano solo il 3% del volume di rifiuti totale, contengono il 95% della radioattività totale. Esistono due tipologie di

rifiuti altamente radioattivi: il combustibile utilizzato ed il prodotto di scarto del riprocessamento del combustibile esausto.

Al fine di ridurre parzialmente le problematiche correlate allo smaltimento ed alla disposizione dei rifiuti altamente radioattivi, occorre effettuare un riprocessamento del combustibile esausto. La capacità globale di riprocessamento del combustibile è di circa 5600 tonnellate all'anno e gli impianti più grandi sono localizzati nel Regno Unito, in Francia, in Giappone, in Russia ed in India. Nonostante gli Stati Uniti siano il maggior produttore di rifiuti nucleari ad alta attività, essi non possiedono alcun impianto di riprocessamento di combustibile.

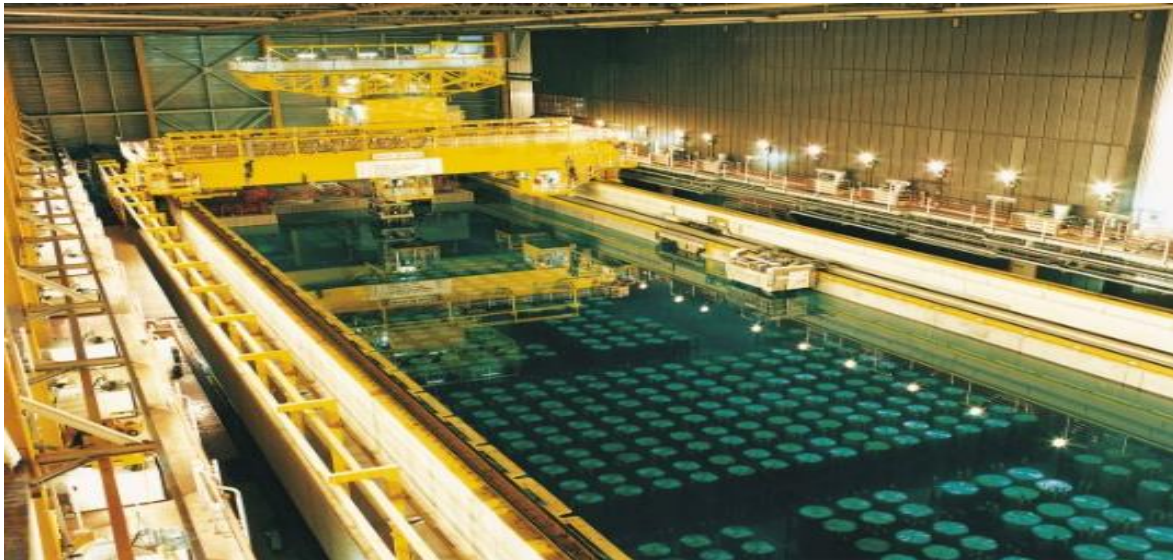


Figura 30: Accumulo di combustibile spento nell'impianto di riprocessamento di Sellafield, Regno Unito. Il combustibile spento è riprocessato per separare il 96% di uranio e l'1% di plutonio, che possono essere riutilizzati sotto forma di ossido metallico, dal 3% di rifiuti altamente radioattivi che vengono trattati ed immagazzinati nell'impianto stesso. A partire dal 2018, tutte le operazioni di riprocessamento sono terminate; mentre, per quanto concerne l'infrastruttura, si prospetta un utilizzo continuativo come accumulo sino al 2070. **Fonte: World Nuclear Association, *Radioactive Waste Management*; URL: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-waste-management.aspx>**

Occorre specificare che si tratta di una soluzione parziale in quanto la capacità globale di riprocessamento è minore della metà della produzione annua di rifiuti e, inoltre, occorre smaltire e disporre gli scarti di questo riprocessamento, i quali presentano ancora un livello di attività molto elevato. Dall'inizio dell'era nucleare, sono stati prodotti circa 370000 tonnellate di rifiuti altamente radioattivi sotto forma di metallo pesante, di cui un terzo è stato riprocessato.

Per le ragioni precedentemente elencate, la comunità scientifica ha deciso di utilizzare dei depositi geologici profondi. Questa soluzione prevede l'immagazzinamento dei rifiuti, isolati attraverso delle barriere ingegneristiche e naturali, a diverse centinaia di metri di profondità. Nonostante diversi stati come Finlandia, Francia e Svezia stiano costruendo queste infrastrutture sotterranee, ad oggi nessuno di questi progetti è stato ancora completato [33].

5.2.3-Aspetti economici

La valutazione dei costi di generazione delle nuove capacità installate è difficoltosa ed è strettamente correlata alle differenti regioni considerate. Al fine di confrontare i costi di generazione tra impianti differenti, è possibile analizzare il costo livellato dell'energia (LCOE). Esso è il rapporto tra la somma del costo del capitale, i costi operativi, i costi di sistema, le esternalità e tasse specifiche, attualizzati in funzione del capitale e la struttura finanziaria adottata, e l'elettricità prodotta durante il periodo designato di funzionamento.

Nello specifico, il costo del capitale complessivo include tutti i costi di preparazione del sito, di costruzione, manifattura, avviamento e gli oneri finanziari del progetto. I costi ingegneristici, di approvvigionamento dei materiali e realizzazione dell'opera rappresentano circa l'80% del costo del capitale non attualizzato, mentre il restante 20% è costituito da costi correlati a contingenze e costi di formazione del personale e collaudo dei sistemi.

Generalmente, i costi di costruzione di un impianto nucleare sono molto più elevati rispetto agli altri impianti convenzionali a causa dell'utilizzo di materiali e sistemi di sicurezza e controllo più avanzati e sofisticati. Il costo di generazione nucleare è fortemente influenzato dal costo del capitale, che può rappresentare fino al 60% del costo livellato finale. In particolar modo, si nota che nei paesi in cui sono stati mantenuti programmi di sviluppo del nucleare, quali Sud Corea, Cina ed India, i costi del capitale non attualizzato sono rimasti contenuti circa pari a 2200\$/kWe; mentre nei paesi OECD, quali Unione Europea e Stati Uniti, si è registrata una crescita da 1900 \$/kWe nel 1990 a 3850\$/kWe nel 2009 a causa dei continui ritardi costruttivi.

I costi finanziari sono strettamente dipendenti dal periodo complessivo di costruzione e gli oneri applicabili sulla quota di debito. Il periodo complessivo di costruzione consiste nell'intervallo di tempo compreso tra gli inizi dei lavori di costruzione e l'allacciamento alla rete. In passato, si è registrato una durata media di costruzione di circa cinque anni, che comportava oneri finanziari pari circa al 30% del costo del capitale totale. Considerando, invece, un periodo costruttivo medio pari a sette anni, si registra un impatto degli oneri finanziari del 40%.

Il costo dell'energia livellato è strettamente dipendente dal tasso di interesse considerato. Basti immaginare che, utilizzando un tasso di interesse pari al 3%, si ottiene un LCOE che varia da 29\$/MWh per la Corea del Sud a 64 \$/MWh per il Regno Unito; mentre utilizzando un tasso di interesse pari al 10%, si ottiene un LCOE pari a 51\$/MWh per la Corea e 136\$/MWh per il Regno Unito.

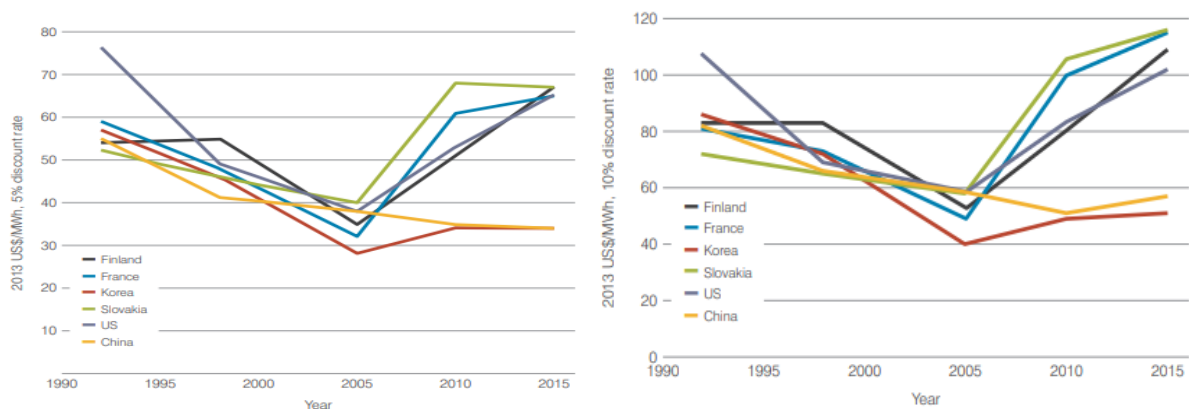


Figura 31: Evoluzione del LCOE del nucleare in differenti regioni attualizzato con differenti tassi di interesse. (Sinistra) LCOE in dollari al megawattora del 2013 attualizzato con un tasso di interesse del 5%. (Destra) LCOE in dollari al megawattora del 2013 attualizzato con un tasso di interesse del 10%. **Fonte: IEA/NEA, *Projected Cost of Generating Electricity 2015 edition***

Il costo di generazione nucleare, valutato utilizzando un tasso di interesse al 3%, è l'opzione più economica per tutti i paesi del mondo. L'aumento del tasso di interesse comporta una crescita vertiginosa dei costi a causa dell'elevata intensità del capitale di progetto. Utilizzando un tasso di interesse pari al 7%, si ottiene un costo di generazione nucleare leggermente più elevato di quello del carbone, ma minore di quello dei cicli combinati a gas. Infine, facendo riferimento ad un tasso di interesse del 10%, si ottiene un LCOE del nucleare che è maggiore sia del corrispettivo del carbone che del gas naturale. In queste valutazioni è stato considerato un carbon price di 30\$/t e le variazioni regionali dei prezzi dei combustibili.

I costi operativi dell'impianto includono i costi del combustibile, i costi operativi e manutentivi e un fondo per il futuro smantellamento dell'impianto e disposizione dei rifiuti. I costi operativi possono essere suddivisi in costi fissi, ossia tutte le spese a cui occorre far fronte anche in caso di non funzionamento dell'impianto, ed i costi variabili, che dipendono dall'output elettrico generato. Essi rappresentano circa il 66% dei costi operativi totali.

L'elevata densità energetica dell'uranio comporta che i costi del combustibile siano minori rispetto a quelli del gas naturale e del carbone a parità di generazione elettrica. Occorre considerare, però, che l'uranio deve essere processato, arricchito e trasformato in pellet. Questi processi possono rappresentare circa il 50% dei costi totali del combustibile.

I costi di smantellamento rappresentano circa il 9-15% del costo del capitale iniziale di progetto. Una volta attualizzati sulla vita media dell'impianto, essi contribuiscono solo al 2% del costo di investimento e circa 0,1-0,2 cent/kWh del costo di generazione elettrica.

I costi delle esternalità non sono inclusi nei costi costruttivi e operativi, in quanto essi non vengono pagati dal consumatore. Essi sono definiti come i rischi ambientali e sanitari a cui è sottoposta una comunità e possono essere quantificati attraverso delle indagini o dei metodi approssimativi. Essi sono solitamente assunti pari a zero, sebbene in alcuni casi si possa includere un capitale per mitigare gli impatti di un incidente nucleare grave.

I costi di sistema sono inclusi nei costi di trasmissione e distribuzione che paga il consumatore finale. Generalmente essi non vengono presi in considerazione nel calcolo del costo livellato dell'energia, introducendo degli errori significativi nelle valutazioni economiche e le proiezioni di competitività futura di una tecnologia. Ogni qual volta si aggiunge una nuova capacità nella rete, occorre analizzare le modifiche ed i costi a cui deve essere sottoposta l'intera rete elettrica per garantire prestazioni performanti in termini di stabilità e flessibilità. Questi costi per gli impianti di taglia grande che operano in maniera continuativa per incontrare il carico base sono molto piccoli, circa pari a 1-3\$/MWh, rispetto ai costi di integrazione dei generatori rinnovabili, che sono invece dell'ordine di 8-50\$/MWh.

Infine, occorre considerare le tasse specifiche imposte sulla generazione nucleare. Nell'Unione Europea, differenti stati hanno adottato sistemi di tassazione:

- In Belgio, nel 2014, l'applicazione di una tassa pari a 0,005 €/kWh ha contribuito alla riscossione totale di 479 milioni di euro. Nel 2015, l'azienda energetica Electrabel ha accettato un accordo di pagamento di 130 milioni di euro per la generazione nucleare nel 2016 e di scontare una multa pari a 20 milioni di euro all'anno per l'implementazione di vita media di Doel 1&2. Dal 2017, si utilizza una nuova formula per il calcolo dei contributi da versare che prevede un minimo di pagamento di 150 milioni di euro annui.
- A partire dal 2000, la Svezia ha introdotto una tassa specifica sulla capacità nucleare installata. Nel 2015, sono stati riscossi ben 435 milioni di euro a seguito di differenti incrementi e cambiamenti della formula di calcolo dei contributi. A causa della recessione del nucleare negli ultimi anni, il governo svedese ha deciso di eliminare questo modello contributivo a partire dal 2017.
- In Germania, è stata proposta una tassazione basata sul consumo specifico di combustibile dal 2010 al 2016, che ha comportato la riscossione di circa 6,3 miliardi di euro. Dopo diversi processi giuridici, la Corte Costituzionale Federale ha dichiarato questi provvedimenti incostituzionali e che le aziende danneggiate debbano essere rimborsate.
- Nel Regno Unito, è stata adottata il Climate Change Levy, ossia una tassa sul dispacciamento di energia per usi non domestici. L'obiettivo è fornire un incentivo per aumentare

l'efficienza energetica del parco attuale e ridurre le emissioni di anidride carbonica [34] [35] [36].

CAPITOLO 6- DESCRIZIONE DEI MODULI DI INPUT

6.0-Panoramica

L'obiettivo di questo capitolo è fornire le indicazioni chiave sul funzionamento dei differenti moduli di Java Climate Model. In particolare, si descrivono il funzionamento base, ossia l'approccio di calcolo utilizzato, e le interazioni dei moduli Electricity Generation, Energy, Demographics ed Economy. Inoltre, si riporta una descrizione minuziosa ed esaustiva delle singole variabili analizzate attraverso l'utilizzo di grafici e tabelle riassuntive.

6.1-Schema di calcolo

L'evoluzione del parco elettrico e delle relative emissioni è correlata a differenti fattori socioeconomici ed energetici interdipendenti tra di loro. Al fine di garantire l'accessibilità, la sicurezza di approvvigionamento e la sostenibilità del settore di produzione di potenza, occorre effettuare un'analisi ed un processamento di questi fattori. Essi, spesso, incidono sia sul lato della domanda che dell'approvvigionamento attraverso complessi processi di interazioni cicliche e, per questa ragione, vengono parametrizzati attraverso l'utilizzo di modelli di valutazioni integrata. In particolar modo, il modulo *Electricity Generation* interagisce con i moduli *Economy*, *Demographics* ed *Energy*.

Gli input economici utilizzati sono il capitale accumulato, composto da capitale infrastrutturale, tecnologico e altamente tecnologico, prodotto interno lordo, tasso di risparmio medio, fattore totale di produttività e capitale umano.

Per quanto concerne il modulo demografico, gli input adoperati sono stati popolazione globale, flussi migratori netti, tasso di fertilità, tasso di dipendenza e popolazione in età lavorativa.

Gli input energetici consistono, infine, in scenario WEO di riferimento, carbon price, elasticità della domanda e potenziale tecnico delle rinnovabili.

6.2-Economy

6.2.1- Introduzione

Questo modulo calcola gli sviluppi economici di ogni paese basandosi sugli input del modulo *Demographics* e delle altre variabili proprie di questo componente. Il modulo dovrebbe presentare alcuni adattamenti per inglobare le interazioni con il mondo dell'energia; a causa, però, della relativa mancanza di informazioni settoriali specifiche e le loro relazioni stocastiche con fattori economici, non è stato possibile implementare in maniera esaustiva queste interazioni nel codice.

Inoltre, esso non utilizza lo stesso approccio del modulo *Electricity Generation*: la visione dei decisori politici è lungimirante e viene utilizzato un approccio misto top-down e bottom-up. Inizialmente, il modello simula l'evoluzione delle differenti variabili seguendo un approccio bottom-up, forzato quindi dai trend storici e dalle previsioni utilizzate. Successivamente, viene applicato un approccio top-down che tende a far convergere gli indici economici dei singoli paesi in via di sviluppo e sottosviluppati a quelli dei paesi sviluppati.

I dati inseriti provengono dai database della Internationaly Monetary Fund e dalla Penn World Tables aggiornati al 2017 [37] [38].

6.2.2-Il capitale totale

Il capitale totale è la somma del capitale infrastrutturale, tecnologico e altamente tecnologico, a sua volta suddivisi in capitale a breve, media e lunga vita media. Questa suddivisione aiuta a distinguere i paesi più sviluppati da quelli meno sviluppati. I dati utilizzati vengono riportati in **Figura 32**, in cui si riporta il capitale in dollari del 2005 per parità di potere d'acquisto.

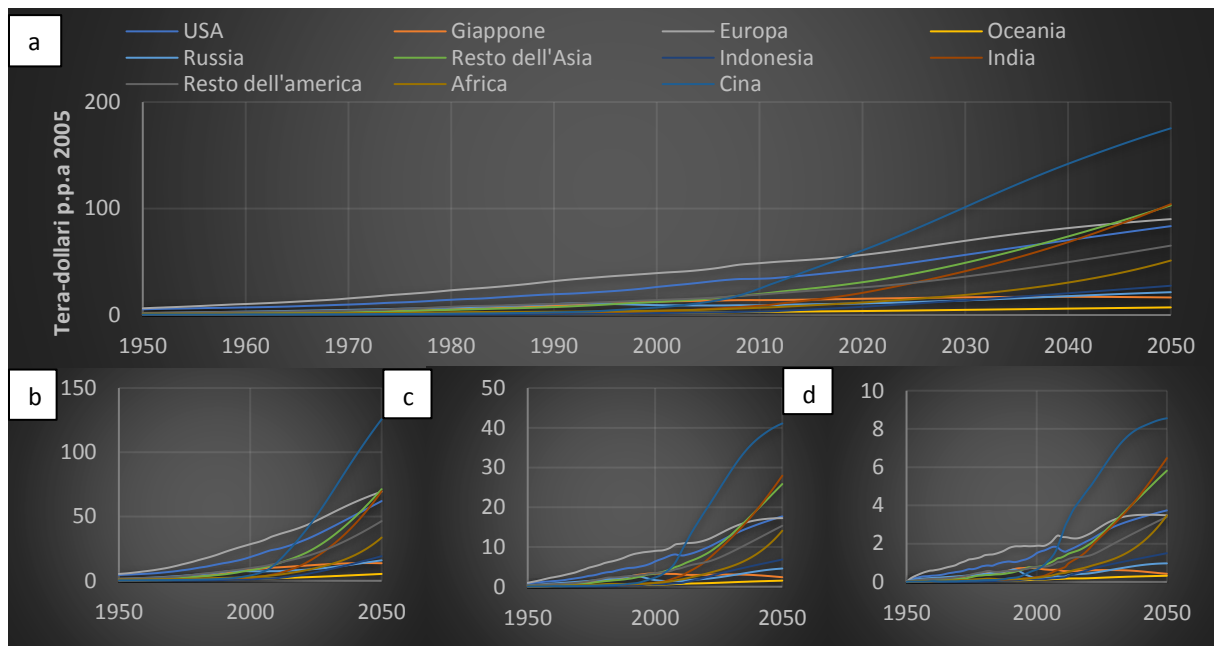


Figura 32: L'evoluzione del capitale totale tra il 1950 ed il 2050 (a). È possibile calcolare il capitale totale come somma tra capitale infrastrutturale (b), capitale tecnologico (c) e capitale hi-tech (d). **Fonte: Java Climate Model, Economy Database**

6.2.3-Il capitale umano

Il capitale umano è un bene intangibile che può essere definito come il valore economico dell'esperienza e delle abilità di un lavoratore. In particolare, esso include diversi aspetti sociali riguardanti l'educazione scolastica, la salute, l'intelligenza e la formazione del lavoratore. Occorre specificare che il capitale umano tiene in considerazione la diversità degli impieghi attraverso dei fattori moltiplicativi. Esso è, quindi, correlato alla produttività e, di conseguenza, ai guadagni di un paese.

Inoltre, il capitale umano è strettamente dipendente dai flussi migratori. Su scala nazionale, la fuga di cervelli, causata dall'incipiente globalizzazione, risulta in un impoverimento del capitale umano di un paese. È possibile, anche, definire un capitale umano su scala minore, riferendosi a regioni o città, e riportarne le modifiche in relazione al flusso netto di popolazione da zone rurale ad urbane.

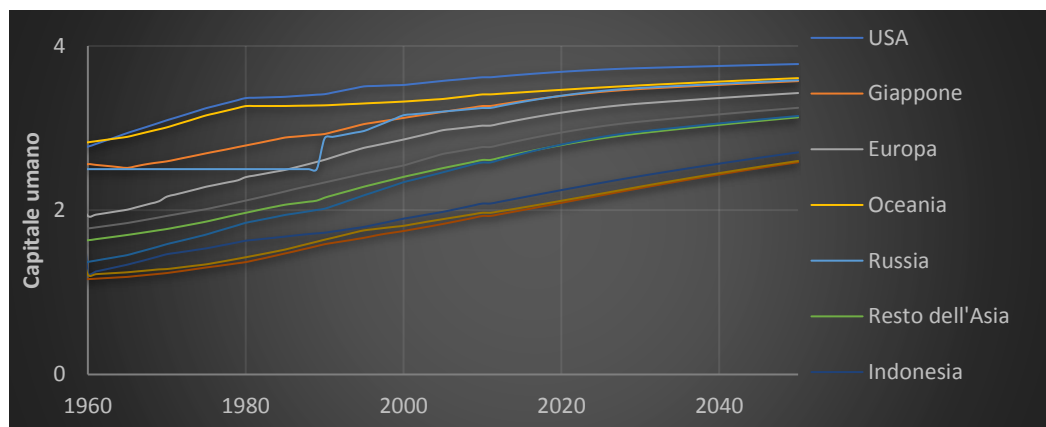


Figura 33: Indice del capitale umano basato su anni di scolarizzazione e rendimento di differenti nazioni. **Fonte: Java Climate Model, Economy Database**

Esso impatta l'economia di un paese attraverso delle esternalità produttive: un aumento corrisponde ad un incremento della produttività totale e del benessere collettivo della società. La misurazione più frequente del capitale umano è riferita al reddito pro capite: le indagini OECD mostrano una crescita del 5% del reddito pro-capite per ogni anno di istruzione in più [39].

6.2.3-Tasso di risparmio

Il tasso di risparmio è il rapporto tra la quantità di denaro che viene risparmiata ed il reddito personale netto. Sostanzialmente, esso è un indice che riflette la tendenza della popolazione a ridurre spese correnti in favore di consumi futuri. Il reddito personale netto viene valutato come la differenza tra il reddito personale lordo e le tasse statali pagate su questo reddito.

Le condizioni di stabilità economica, inflazione e salario medio influiscono significativamente sul tasso di risparmio. I periodi di grande recessione economica, come la crisi globale finanziaria del 2007 o le recenti crisi geopolitiche in Cile e Venezuela, inducono un elevato aumento del tasso di risparmio. Inoltre, un aumento della produzione interna lorda ed un relativo aumento del reddito personale netto inducono un effetto positivo sul tasso di risparmio.

Tassi di interesse elevati possono condurre ad un abbassamento del consumo totale e ad un aumento del tasso di risparmio. In particolar modo, ciò è correlato all'aumento relativo dell'effetto di sostituzione che tende a prevalere sull'effetto dell'aumento di salario. Indubbiamente, il tasso di risparmio è strettamente correlato anche da aspetti socioculturali, quali la percezione dei possedimenti materiali e del debito. Infine, esso è anche dipendente da alcuni aspetti demografici: il più importante è indubbiamente l'età media della popolazione. Si associa un tasso di risparmio più elevato per una popolazione giovane, mentre si verifica il contrario per una popolazione media più anziana.

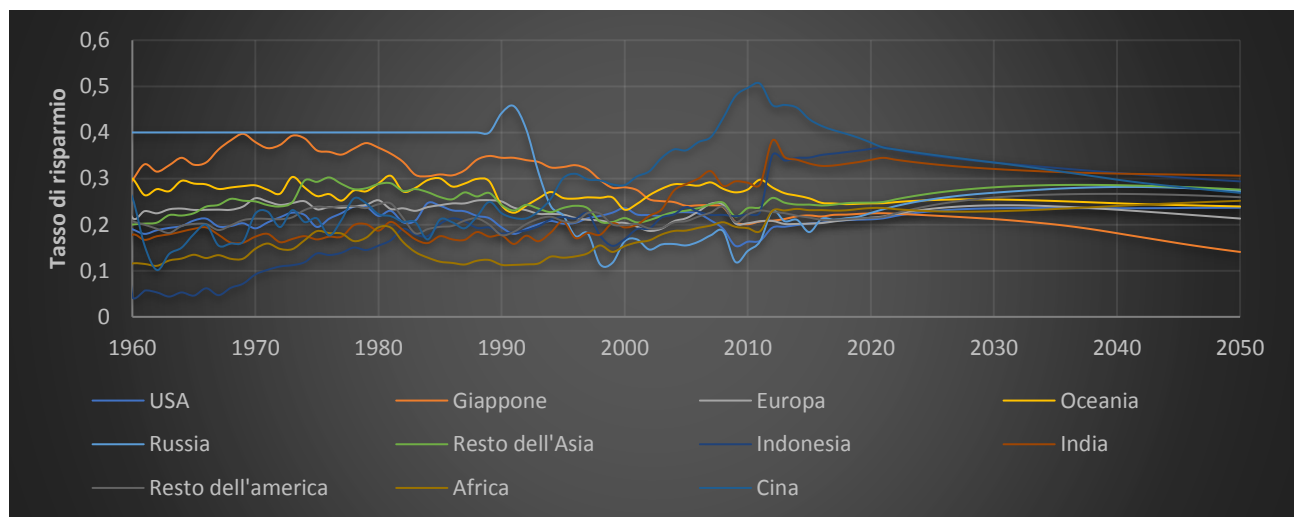


Figura 34: Evoluzione del tasso di risparmio su base nazionale. Fonte: **Java Climate Model, Economy Database**

6.2.4- Il prodotto interno lordo

Il prodotto interno lordo è un indice macroeconomico che misura il valore aggregato di tutti i beni e servizi finali prodotti sul territorio ai prezzi di mercato. Generalmente si riferisce ad un periodo di un anno e viene riferito ad un anno di riferimento o se ne calcola la variazione relativa rispetto all'anno precedente.

Viene definito interno perché include tutte le attività economiche svolte nei confini di un paese, non tiene quindi conto dei prodotti e servizi prodotti da lavoratori o imprese all'estero. Lordo indica che non è stato considerato l'ammortamento, ossia il deprezzamento del prodotto e del servizio nel periodo considerato.

Il prodotto interno lordo nominale è basato su una stima monetaria dei beni e dei servizi ed è, per questa ragione, soggetto ad inflazione. L'aumento dei prezzi causerà un relativo aumento del PIL,

mentre la tendenza opposta ne causerà una diminuzione. Non è quindi possibile definire a priori se l'aumento del PIL sia imputabile ad una effettiva espansione economica o ad una crescente inflazione.

È possibile, quindi, correggere questo parametro attraverso la parametrizzazione dell'effetto dell'inflazione. Sostanzialmente si utilizza un anno di riferimento ed il livello dei prezzi di questo anno per comparare due anni ad inflazione differente e correggere il prodotto interno nominale attraverso un fattore moltiplicativo.

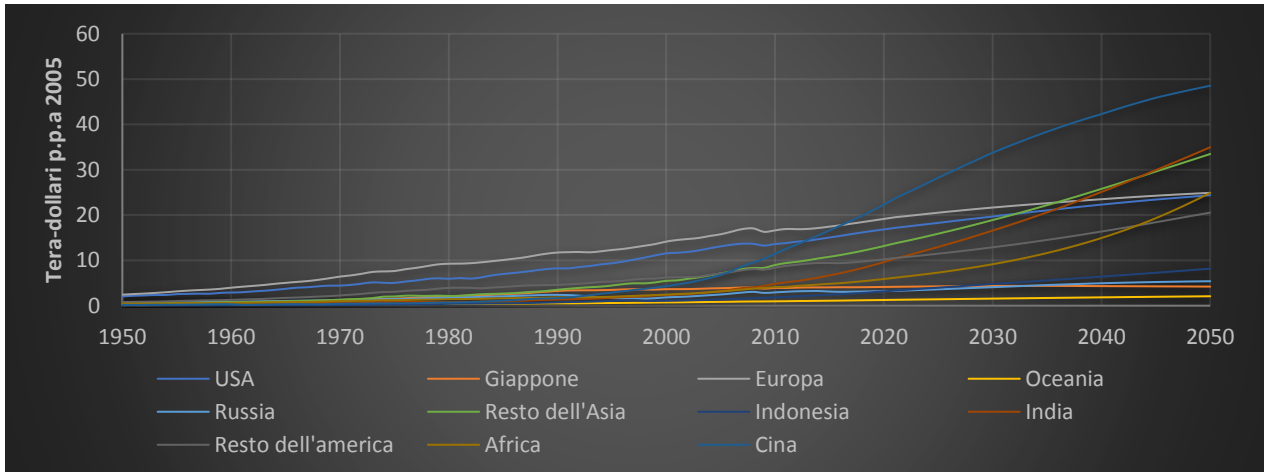


Figura 35: Evoluzione del prodotto interno lordo in tera-dollari del 2005 su base nazionale. Fonte: Java Climate Model, Economy Database

6.2.5-Fattore di produzione totale

Il fattore di produttività misura le quantità di output, quali prodotti, beni o servizi, in funzione dell'unità di input, in termini di capitale, risorse o lavoro. Generalmente, esso viene calcolato come il rapporto tra prodotto interno lordo e ore lavorative complessive.

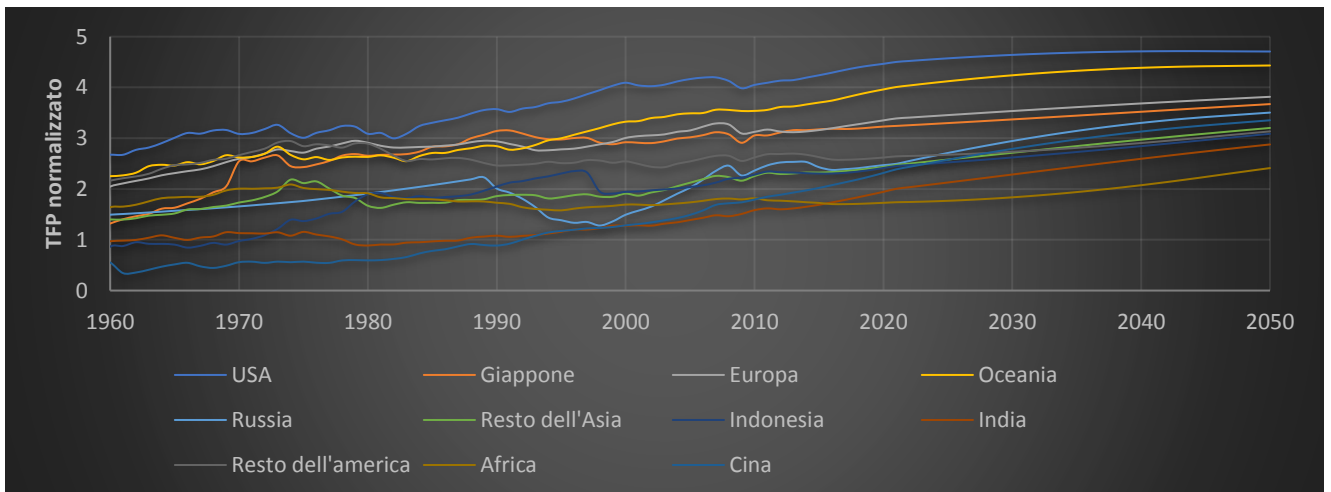


Figura 36: Evoluzione del Total Factor productivity normalizzato su base nazionale. Fonte: Java Climate Model, Economy Database

La produttività di un paese è influenzata da diversi fattori, come gli investimenti infrastrutturali e tecnologici, miglioramenti del capitale umano e tasso di risparmio. In particolare, il fattore di produzione totale è definito come la porzione degli output che non è direttamente attribuita all'accumulo di lavoro e capitale. Sostanzialmente, esso riflette il contributo del capitale umano e

delle innovazioni tecnologiche e logistiche di un paese. Può essere considerato, quindi, il livello di efficienza economica di un paese.

6.3-Demographics

6.3.1-Introduzione

Per questo modulo valgono le stesse considerazioni effettuate per il modulo *Economics* nel **paragrafo 6.2.1**. I dati utilizzati provengono dalle stime del World Population Prospects del 2017 [40] .

6.3.2-Popolazione mondiale

Le proiezioni dell'evoluzione della popolazione mondiale sono molto importanti per valutare la corrispettiva domanda di energia. La popolazione mondiale attuale è costituita da 7,6 miliardi di persone e si prospetta un aumento a 8,6 miliardi nel 2030 e a quasi 10 miliardi nel 2050. L'aumento medio annuo è stimato essere pari a 83 milioni e si prevede che questo andamento continui ad aumentare, nonostante si assume una diminuzione del livello di fertilità globale.

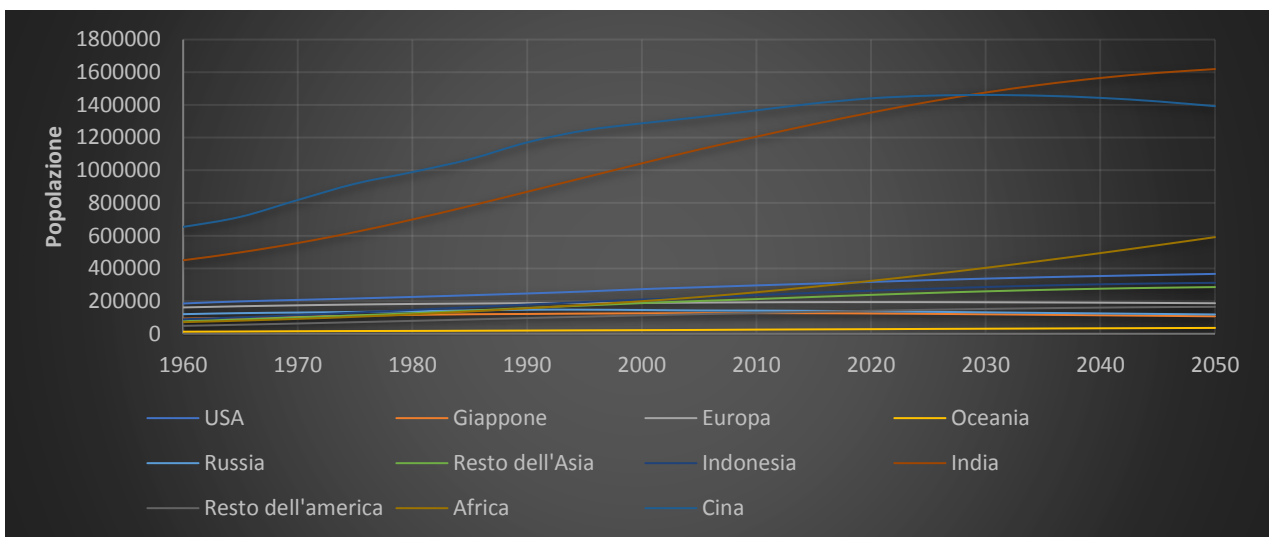


Figura 37: Evoluzione della popolazione mondiale su base nazionale. Fonte: Java Climate Model, Demographics Database

6.3.3-Popolazione in età lavorativa

La popolazione in età lavorativa è definita come la popolazione di età compresa tra i 20 ed i 64 anni. Esso è un indicatore di base per definire il tasso occupazionale di un paese, nonché la produttività economica effettiva.

In particolar modo, il rapporto di sostegno potenziale, ossia il rapporto tra la popolazione in età lavorativa e la popolazione over 65 anni, varia significativamente tra i differenti paesi. Esso è massimo in Africa, in cui si raggiunge un valore quasi uguale a 13, mentre è molto piccolo in Europa, in cui si registra un rapporto pari a 3. La diminuzione relativa maggiore tra il 2017 ed il 2050 avverrà in Asia e in America latina e Caraibi.

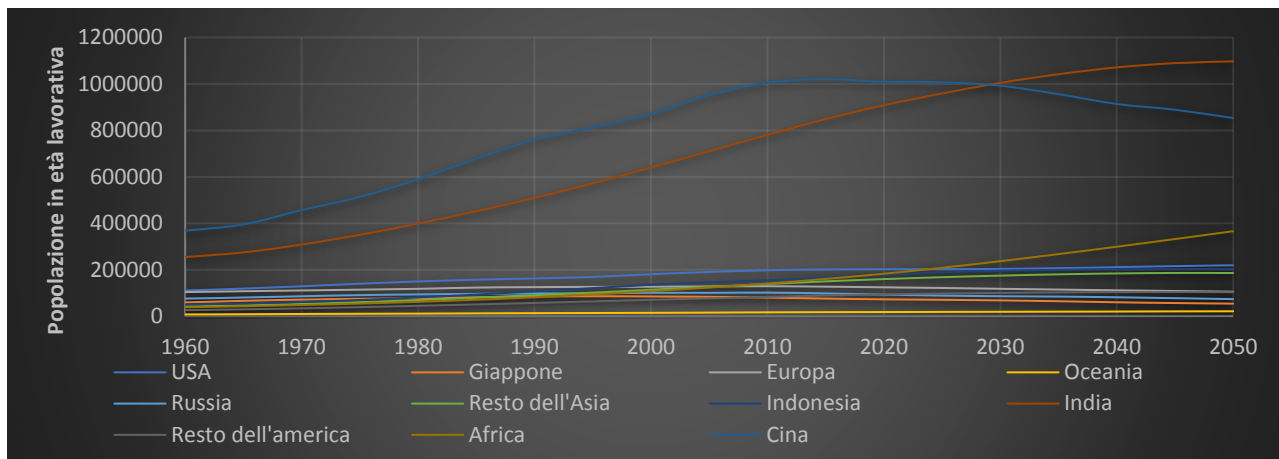


Figura 38: Evoluzione della popolazione in età lavorativa su base nazionale. Fonte: Java Climate Model, Demographics Database

6.3.4-Tasso di fertilità

Il tasso di fertilità totale rappresenta l'assoluta natalità potenziale di un paese. Essa è misurata come il rapporto tra il numero medio di bambini e la popolazione femminile in età fertile, intervallo compreso tra i 15 ed i 49 anni. Negli ultimi decenni, diversi paesi hanno registrato una riduzione nel numero di nascite per ogni donna in età fertile. Tra il 2010 ed il 2015, è stato valutato un valore di fertilità globale complessiva pari a 2,5.

In questo periodo, circa il 46% della popolazione mondiale viveva in paesi, quali India, Indonesia, Pakistan, Bangladesh e Messico, con tassi di fertilità intermedi, compresi tra 2,1 e 5 figli per ogni donna in età fertile.

Una porzione di popolazione circa uguale a quella precedente viveva in paesi con tassi di fertilità bassi, ossia valori minori di 2,1 figli per ogni donna in età fertile. In particolare, si stima che un tale tasso di fertilità non garantisca una sostituzione generazionale efficace. Tra questi paesi è possibile annoverare la Cina, gli Stati Uniti, Brasile, Russia, Giappone e Vietnam.

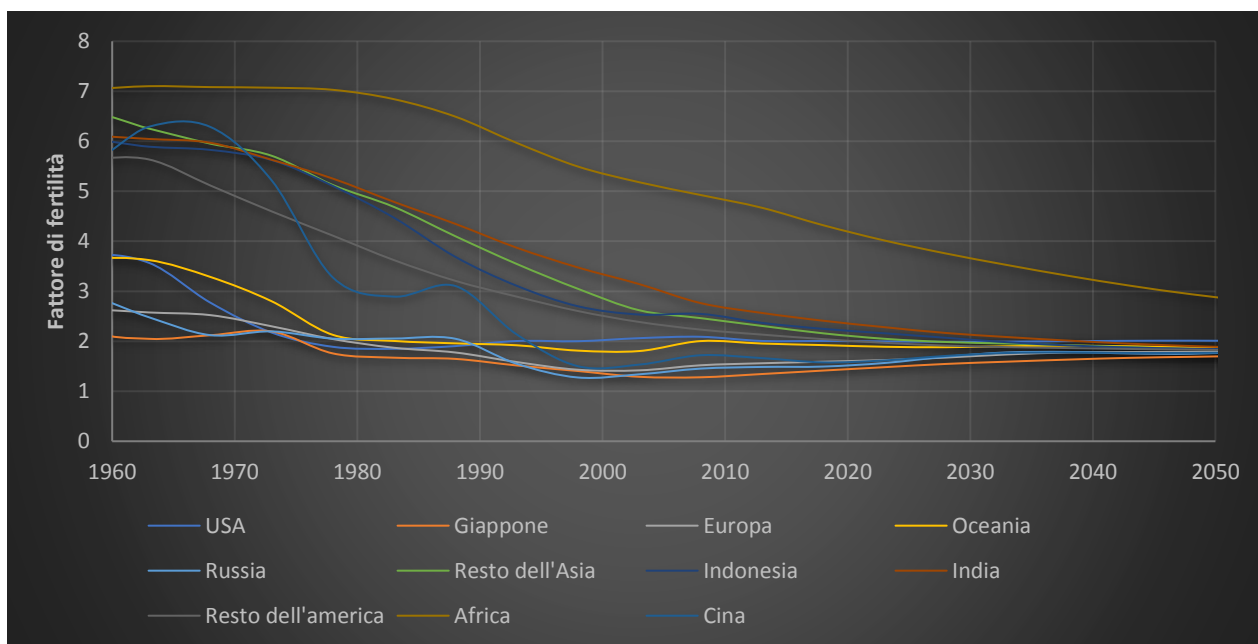


Figura 39: Evoluzione del fattore di fertilità medio. Fonte: Java Climate Model, Demographics Database

Il tasso di fertilità futuro sarà principalmente determinato dall'evoluzione della popolazione nelle differenti regioni del mondo. Nel 2050, circa il 70% della popolazione mondiale vivrà in paesi con un tasso di fertilità basso. Inoltre, nessun paese presenterà un tasso di fertilità maggiore di 5 figli per donna in età fertile. La media mondiale sarà pari a 2,2 figli per donna in età fertile tra il 2045 ed il 2050.

6.3.5-Flusso migratorio netto

La popolazione di un paese può aumentare in funzione del tasso di fertilità, di mortalità e dei flussi migratori netti. Nella maggior parte dei paesi, le migrazioni internazionali giocano un ruolo minore nei cambi di popolazione complessiva. Occorre rimarcare, però, che i casi di Europa, Nord America e Oceania mostrano che i flussi migratori possono rappresentare un contributo preponderante nella crescita della popolazione.

In particolar modo, il flusso migratorio netto entrante in Europa è riuscito a compensare la diminuzione progressiva della popolazione autoctona tra il 1990 ed il 2000. Nonostante si prospetta che, anche in futuro, vi sarà un flusso migratorio netto entrante in Europa, la popolazione diminuirà a causa della diminuzione del tasso di natalità.

In Africa, Asia e America Latina, la popolazione continuerà a crescere dominata da un surplus delle nascite rispetto alle morti, nonostante si verificherà un flusso migratorio netto uscente. Per le previsioni future, si assume che le sostanziali differenze economiche e demografiche tra i differenti paesi nel mondo rimangano il motore dei flussi migratori internazionali.

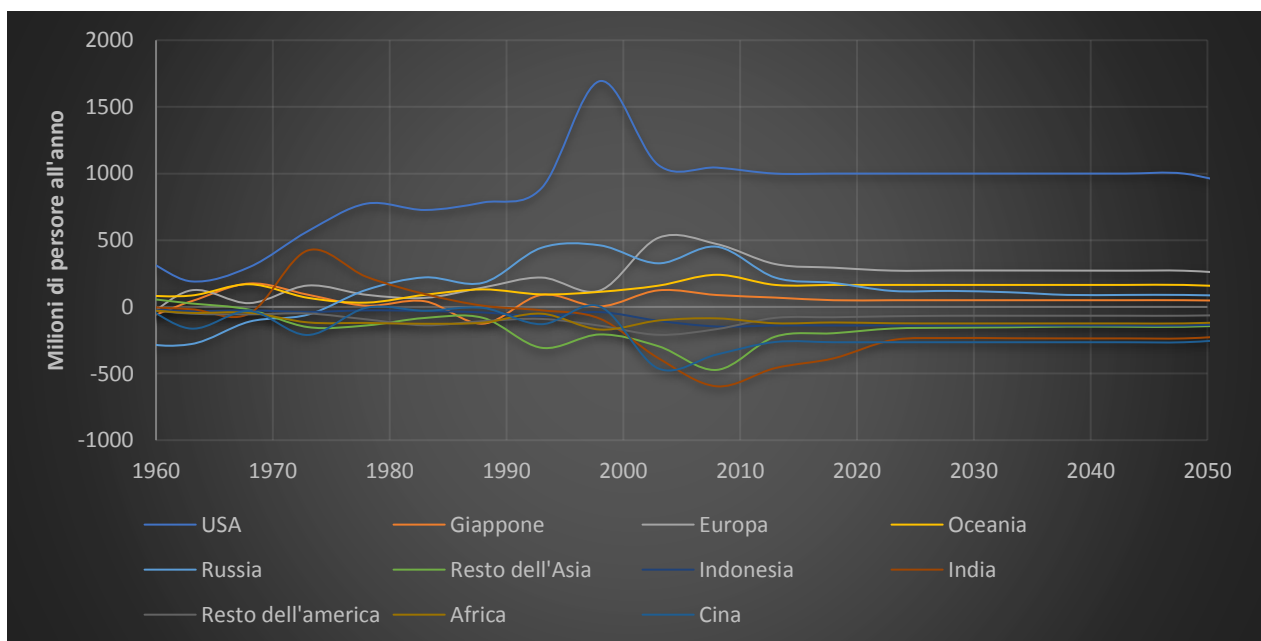


Figura 40: Flusso migratorio netto annuo su base nazionale. Il flusso migratorio netto è positivo se è entrante, mentre è negativo nel caso contrario. **Fonte: Java Climate Model, Demographics Database**

6.3.6-Tasso di dipendenza

Il tasso di dipendenza è il rapporto tra la popolazione che non è in età lavorativa, ossi la popolazione al di sotto dei 14 anni e quella al di sopra dei 65, e la popolazione in età lavorativa. Questo indice mostra la pressione media sulla popolazione produttiva.

Le considerazioni sul tasso di dipendenza sono fondamentali per le istituzioni governati e private, in quanto è un fattore che incide significativamente sulla produttività di un paese. Un basso indice di dipendenza è associato, quindi, ad una pressione minore della popolazione produttiva che si traduce

in minore costi e imposte sui fondi pensionistici e sociali. Strategie di aumento del tasso di fertilità e favoreggiamento all'immigrazione garantiscono l'abbassamento di questo indice. Occorre, però, che a queste strategie corrisponda un effettivo aumento del prodotto interno lordo e della produzione, altrimenti si potrebbe creare un effetto radicalmente opposto ed inserire un'esternalità negativa nel sistema economico di un paese.

L'età media della popolazione continuerà ad aumentare. Nel 2050, in tutte le regioni, eccetto che in Africa, circa un quarto della popolazione sarà over 60. La popolazione under 14 diminuirà più del 10% in Asia ed in America Latina e circa del 9% in Europa tra il 2017 ed il 2050. Questo invecchiamento della popolazione globale sarà causato dalla diminuzione del tasso di fertilità e l'aumento delle aspettative di vita.

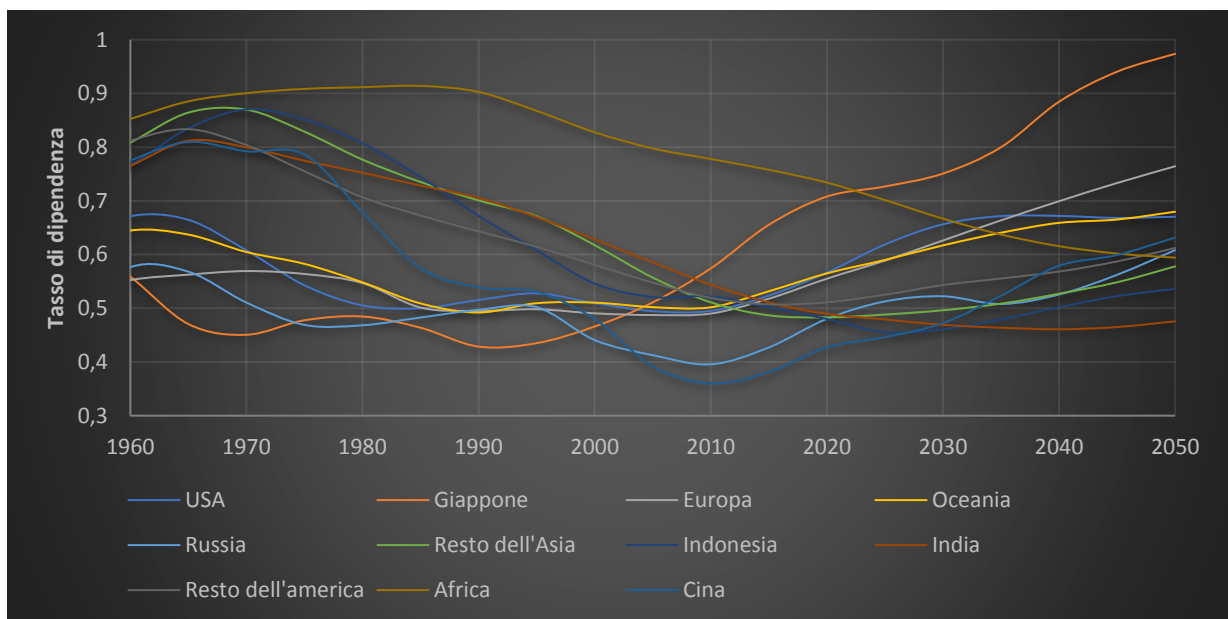


Figura 41: Evoluzione del tasso di dipendenza su base nazionale. Fonte: Java Climate Model, Demographics Database

6.4- Energy

6.4.1-Introduzione

Per questo modulo valgono le stesse considerazioni effettuate per il modulo *Electricity generation* nel **paragrafo 4.2.3**. Gli input utilizzati provengono dal World Energy Outlook del 2013, lo Short Outlook 2030 e la World Bank [41] [42].

6.4.2-Scenario di riferimento WEO

Dal 1993, la IEA ha fornito previsioni energetiche a medio e a lungo termine attraverso l'utilizzo del World Energy Model, un modello a grande scala che replica il funzionamento del mercato energetico. Esso è utilizzato, in particolare, per calcolare le informazioni settoriali e regionali usate negli scenari WEO. Gli scenari di riferimento disponibili sul software per la valutazione dell'evoluzione della domanda e dell'approvvigionamento di energia sono il *Current Policies Scenario*, il *New Policies Scenario* e il *450 Scenario*.

- Il *Current Policies Scenario* è basato su tutte le implementazioni delle politiche energetiche e misure già avviate nel 2013.
- Il *New Policies Scenario* prende in considerazione tutte quelle iniziative e progetti, che presentano un grado di realizzabilità veritiero, che sono stati annunciati o discussi, ma non ancora avviati.

- Il *450 Scenario* descrive tutti i possibili percorsi per garantire una probabilità del 50% di ridurre l'aumento di temperatura al di sotto dei 2°C rispetto al livello medio preindustriale.

Il software processa e corregge i dati di riferimento WEO in funzione delle altre variabili dei moduli *Energy* ed *Electricity Generation*. Ne consegue, quindi, che i risultati finali si discosteranno parzialmente dalle previsioni e dai dati riportati in questo paragrafo. Inoltre, le proiezioni vengono estese al 2050 attraverso un processo di interpolazione lineare della serie di dati 1990-2035.

Tabella 1: [Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica per i differenti scenari di riferimento](#). Sia le emissioni di anidride carbonica dello scenario *Current Policies* che quelle dello scenario 450 mostrano un discostamento dal livello di emissioni attuali significativo. Lo scenario *New Policies*, invece, mostra un andamento delle emissioni che ben approssima i dati emissivi più recenti. **Fonte: Java Climate Model, Energy database**

| Emissioni di anidride carbonica [MtCO ₂] | | | |
|--|------------------|--------------|---------------|
| Anno | Current Policies | New Policies | S450 Scenario |
| 1990 | 20925 | 20925 | 20925 |
| 1995 | 23235 | 23235 | 23235 |
| 2000 | 25551 | 25551 | 25551 |
| 2005 | 27865 | 27865 | 27865 |
| 2010 | 30251 | 30251 | 30251 |
| 2015 | 32742 | 32742 | 32742 |
| 2020 | 35437 | 33740 | 31909 |
| 2025 | 37720 | 34394 | 28422 |
| 2030 | 40007 | 35054 | 24938 |
| 2035 | 42590 | 35444 | 21724 |

Analizzando le emissioni di anidride carbonica del *Current Policies Scenario*, si nota che vi è ancora un ricorso preponderante alle fonti fossili. Poiché l'obiettivo di questo studio è riportare un'analisi del possibile contributo del nucleare nel processo di decarbonizzazione del parco elettrico, l'utilizzo di questo scenario di riferimento non è stato preso in considerazione.

Per quanto concerne il *450 Scenario*, una pre-analisi dei risultati mostra una diminuzione delle emissioni di anidride carbonica che non è in linea con l'evoluzione delle emissioni attuali. Sebbene, quindi, in questo scenario sia stato considerato un effettivo sforzo della comunità internazionale atto a limitare le emissioni di anidride carbonica, occorre rimarcare che, trattandosi di un'analisi a breve termine, l'utilizzo di questo scenario di riferimento conduce a risultati poco attendibili e fuori scala già nei primi anni di simulazione.

Per le motivazioni precedentemente elencate, si è deciso di utilizzare come scenario di riferimento il *New Policies Scenario*. Questo scenario è caratterizzato da un'eliminazione graduale delle fonti fossili che ben riflette le trasformazioni del parco energetico internazionale. Inoltre, i dati di riferimento sull'approvvigionamento di energia primaria, generazione elettrica, prezzo di mercato delle fonti e livello emissivo del parco di produzione di potenza ben approssimano i livelli attuali di questi parametri e le proiezioni più recenti dell'IEA.

Tabella 2: Dati di riferimento del New Policies Scenario. In questa tabella vengono riportati i dati di riferimento dell'approvvigionamento di energia primaria, generazione elettrica ed emissioni di anidride carbonica del settore di produzione di potenza per lo scenario New Policies.

| Anno | TPES [Mtep] | Generazione elettrica [TWh] | Emissioni CO ₂ del settore di produzione di potenza [MtCO ₂] |
|------|-------------|-----------------------------|---|
| 1990 | 8780 | 11820 | 7476 |
| 1995 | 9746 | 14139 | 8706 |
| 2000 | 10716 | 16463 | 9940 |
| 2005 | 11687 | 18787 | 11174 |
| 2010 | 12698 | 21418 | 12327 |
| 2015 | 13777 | 24512 | 13363 |
| 2020 | 14556 | 27374 | 13668 |
| 2025 | 15262 | 30017 | 13831 |
| 2030 | 16013 | 32695 | 13908 |
| 2035 | 16748 | 35337 | 13757 |

Al fine di valutare le emissioni di anidride carbonica relativa alla produzione elettrica, il software utilizza dei fattori di emissioni atmosferica di gas a effetto serra provenienti dai report della IPCC e dell'IEA [43] [42]. Attraverso il prodotto tra questi fattori e la produzione di potenza di ciascuna fonte, è possibile valutare le evoluzioni delle emissioni complessive e specifiche di anidride carbonica.

Tabella 3: Fattori di emissione atmosferica di anidride carbonica del settore di produzione di potenza. In letteratura sono presenti differenti valori di fattori di emissione, per questa ragione, i dati riportati nella seguente tabella, sono stati ottenuti attraverso una scrematura di differenti fonti come riportato in SRREN della IPCC.

| Fonte energetica | Carbone | Petrolio | Gas naturale | Eolico | Fotovoltaico | Marino | Idroelettrico | Biomasse e rifiuti | Nucleare |
|--|---------|----------|--------------|--------|--------------|--------|---------------|--------------------|----------|
| Fattore emissivo [gCO ₂ /kWh] | 1000 | 780 | 450 | 10 | 32 | 10 | 10 | 25 | 65 |

6.4.3-Carbon price

Le tasse sulle emissioni di anidride carbonica sono considerate il mezzo più potente ed efficiente per garantire una transizione energetica efficace. Esse sono atte ad incentivare le aziende energetiche a ridurre le emissioni di gas serra in atmosfera attraverso investimenti nella ricerca e l'utilizzo di fonti pulite, quali rinnovabili e nucleare.

Il cambiamento climatico causerà diversi impatti in termini di produzione economica per le generazioni future. Al fine di internalizzare questi rischi e costi nei prezzi di mercato attuali, la quantificazione del danno ambientale e sociale può essere espresso attraverso l'adozione di un carbon price. Inoltre, i ricavi di queste tasse possono essere reinvestiti in programma di supporto sociale, progetti di riduzione della pressione fiscale, fondi di investimento in tecnologie basse emissive o per la realizzazione degli obiettivi di sostenibilità ambientale della International Energy Agency.

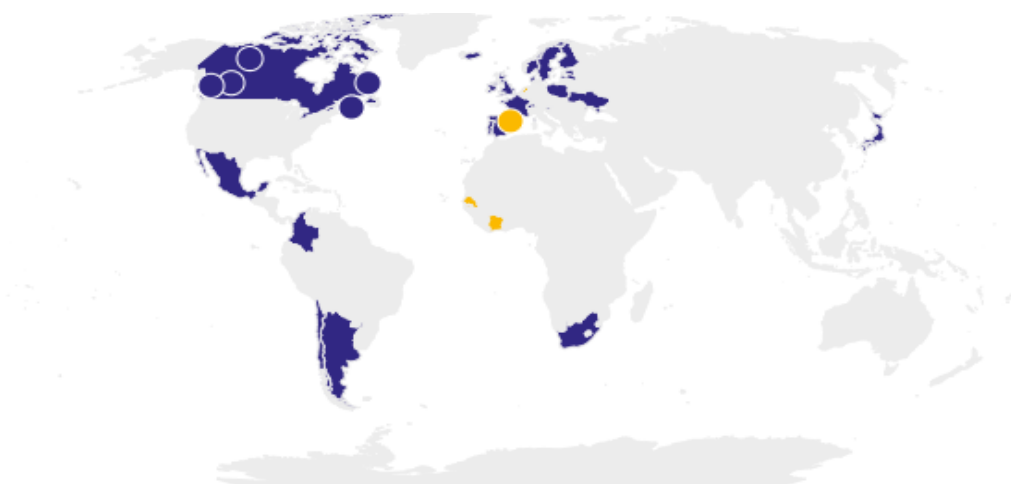


Figura 42: Nazioni che hanno adottato un carbon price. In blu, vengono riportati i paesi che hanno implementato un carbon price; mentre, in giallo, si riportano le nazioni che stanno attualmente discutendo l'introduzione di questa tassa. Attualmente si è molto lontani dall'adozione uniforme di una tassa sulle emissioni di anidride carbonica a livello globale. **Fonte: The World Bank, Carbon Pricing Dashboard**

Al fine di limitare il cambiamento climatico al di sotto dei 2°C, occorre intraprendere delle misure politiche alquanto ambiziose. In particolare, in questo studio si è deciso di adottare un carbon price, in linea con le ricerche più recenti dell'International Monetary Fund, pari a 75\$/tCO₂ nell'anno di riferimento 2030 [44].

6.4.4-Elasticità della domanda

Il prezzo dell'elasticità della domanda di energia è una misura economica della sensitività della domanda energetica ad un aumento di prezzo. In particolar modo, essa fornisce la variazione relativa percentuale della domanda in risposta ad una variazione percentuale unitaria di prezzo.

Tutti i beni e servizi, che rispettano le leggi della domanda e dell'offerta, sono caratterizzati da un'elasticità negativa. Se le variazioni di prezzo hanno uno scarso effetto sulla domanda effettiva del bene in questione, il valore dell'elasticità della domanda è compreso tra 0 e 1 in valore assoluto e la domanda viene definita inelastica. I beni e servizi energetici appartengono a questa categoria (**Figura 43**).

| Determinants | Number of observations | Average elasticity | |
|--------------------|------------------------|--------------------|-----------|
| | | Short term | Long term |
| Good | | | |
| Energy | 376 | -0.149 | -0.572 |
| Electricity | 538 | -0.201 | -0.513 |
| Natural gas | 230 | -0.184 | -0.568 |
| Car fuels | 83 | -0.180 | -0.372 |
| Gasoline | 469 | -0.195 | -0.526 |
| Diesel | 136 | -0.157 | -0.391 |
| Heating oil | 44 | -0.188 | -0.535 |

Figura 43: Elasticità della domanda media nel settore energetico. In questa figura, si riportano i valori di elasticità della domanda dei differenti beni energetici a breve e lungo termine basati su una meta-analisi di regressioni su un numero di osservazioni differente. **Fonte: Labandeira et al. 2017**

Questo parametro ha assunto una rilevanza crescente nelle valutazioni degli effetti socioeconomici e ambientali delle politiche di mitigazione che influenzano i prezzi di mercato delle fonti energetiche. Dal 1970, sono state utilizzate differenti tecniche e metodi per valutare l'elasticità della domanda per differenti paesi sia a breve che a lungo termine.

In questo studio, l'elasticità della domanda elettrica a lungo termine è stata fissata pari a -0,5, basandosi sui risultati ottenuti attraverso un processo di meta-analisi regressiva di *Labandeira et al.* [45].

6.4.5-Potenziale tecnologico delle rinnovabili

I processi di conversione termo-elettrica sono caratterizzati da perdite che variano dal 40 al 90%, a secondo del ciclo termodinamico di riferimento analizzato. L'utilizzo delle fonti rinnovabili, eccetto biomasse e fonti geotermiche, comporta la conversione diretta di energia a meno di altre perdite di conversione specifiche. Sebbene molte fonti rinnovabili abbiano raggiunto una maturità tecnica ed economica considerevole, altre sono ancora in fase di test ed economicamente non disponibili.

Le fonti rinnovabili possono essere impiegate in una rete energetica decentralizzata, ossia caratterizzata da generatori di piccola taglia disposti lungo tutta la rete di distribuzione, oppure centralizzata, in cui si prevede l'utilizzo di impianti di grossa taglia e di una rete di trasmissione. L'adozione di un sistema decentralizzato comporta grossi vantaggi correlati alla quasi totale riduzione delle perdite di trasmissione e distribuzione, ma introduce differenti problematiche di sincronizzazione e controllo del voltaggio della rete; mentre vale l'esatto contrario per le reti centralizzate.

Un aumento della penetrazione delle rinnovabili implica problemi di sicurezza e dispacciamento dell'energia. In particolare, si annovera un aumento significativo dei costi di sistema correlato ad una maggiore difficoltà di gestione e controllo della rete elettrica.

Possibili soluzioni prevedono l'utilizzo di generatori più flessibili, un'estensione e una maggiore interconnessione delle reti elettriche nazionali, una maggiore modularità della domanda di energia, l'utilizzo di sistemi digitali e l'utilizzo di tecniche di accumulo energetico.

Il potenziale teorico delle rinnovabili, ricavato da parametri naturali e climatici come ad esempio la radiazione solare incidente totale, può essere quantificato in maniera abbastanza accurata, sebbene abbia scarse implicazioni dal punto di vista pratico a causa delle problematiche correlate alla disponibilità geografica e temporale di ciascuna fonte, l'integrazione nel sistema elettrico e considerazioni economiche e ambientali.

L'evoluzione tecnologica delle rinnovabili può essere definita attraverso dei fattori produttivi. I modelli economici distinguono due tipologie di cambiamento tecnologico: esogeno, ossia un cambio tecnologico imposto esternamente al modello attraverso una parametrizzazione, ed endogeno, ovvero un cambio tecnologico correlato all'applicazione di un algoritmo di costo di generazione.

Il modello valuta la nuova capacità installata basandosi sui differenti costi livellati dell'energia delle singole fonti rinnovabili e imponendo delle limitazioni sulla capacità installata basandosi sul potenziale tecnologico globale, in linea con i dati riportati nel SRREN della IPCC [43].

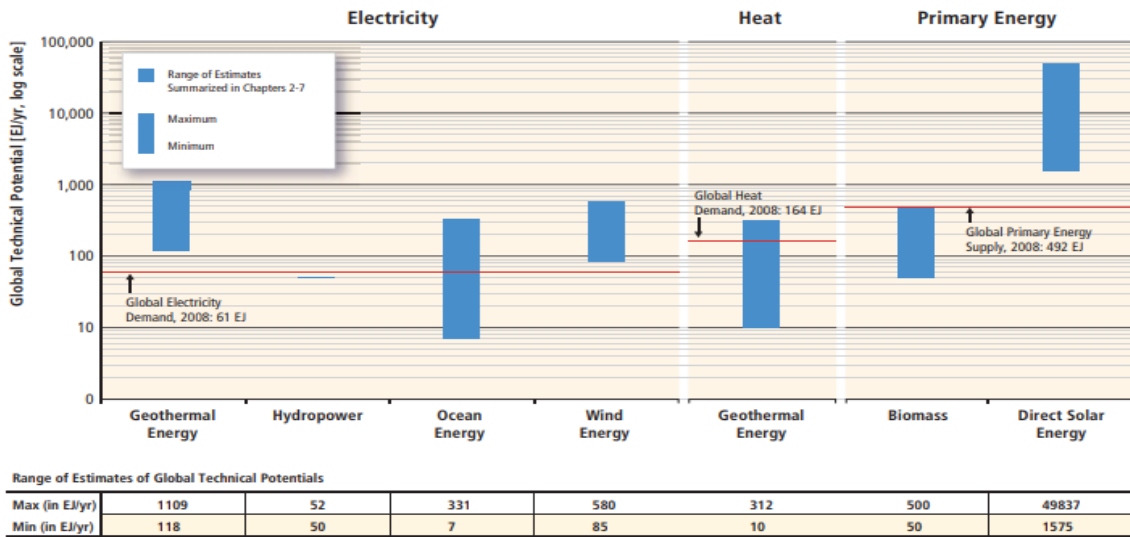


Figura 44: Potenziale tecnologico globale delle rinnovabili. In figura, si riporta il range di potenziale tecnologico delle rinnovabili secondo differenti studi. Il valore minimo corrisponde al caso *basso potenziale*, il valore intermedio al caso *medio potenziale*, il valore massimo al caso *potenziale elevato*. Nel caso *irruzione tecnologica* non è applicata alcuna limitazione tecnica allo sviluppo delle rinnovabili. **Fonte: IPCC, *Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation***

CAPITOLO 7-RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

In questo capitolo verranno riportate l'evoluzione del parco elettrico globale e le relative emissioni di anidride carbonica per i differenti scenari analizzati. In particolar modo, si nota che l'eliminazione graduale delle fonti fossili è pressoché uguale per tutti gli scenari utilizzati; mentre il contributo del nucleare è fortemente dipendente dal corrispettivo potenziale tecnologico delle rinnovabili. Infine, si effettua una valutazione della capacità installata, degli investimenti necessari a raggiungere questi livelli produttivi e si discutono le possibili soluzioni per garantire una maggiore penetrazione nucleare.

7.1- Basso potenziale tecnologico

7.1.1 -Evoluzione del parco elettrico

Assumendo che il potenziale tecnologico delle rinnovabili sia basso e che via sia effettivamente uno sforzo internazionale atto a limitare le emissioni, si ottiene un'evoluzione del parco elettrico fortemente orientata verso l'opzione nucleare.

La produzione elettrica da fonti fossili decresce visibilmente con un tasso medio di -3,7 % all'anno, in linea con le proiezioni WEO, passando da una generazione di circa 19500TWh nel 2020 a 6400 TWh nel 2050. In particolar modo, si registra una decrescita significativa della produzione elettrica da carbone, il quale contribuisce a più del 42% della generazione totale nel 2020, sino al raggiungimento di uno share pari al 5,8% nel 2050. La potenza prodotta da gas naturale, dopo essersi mantenuta costante per circa tre anni a 9000 TWh, decresce con un tasso medio annuo pari a -3,5%, minore in valore assoluto del corrispettivo tasso della produzione da carbone del -4,0%. Infine, la produzione di elettricità di petrolio diminuisce più della metà, passando dai 1400 TWh del 2020 a circa 600 TWh nel 2050.

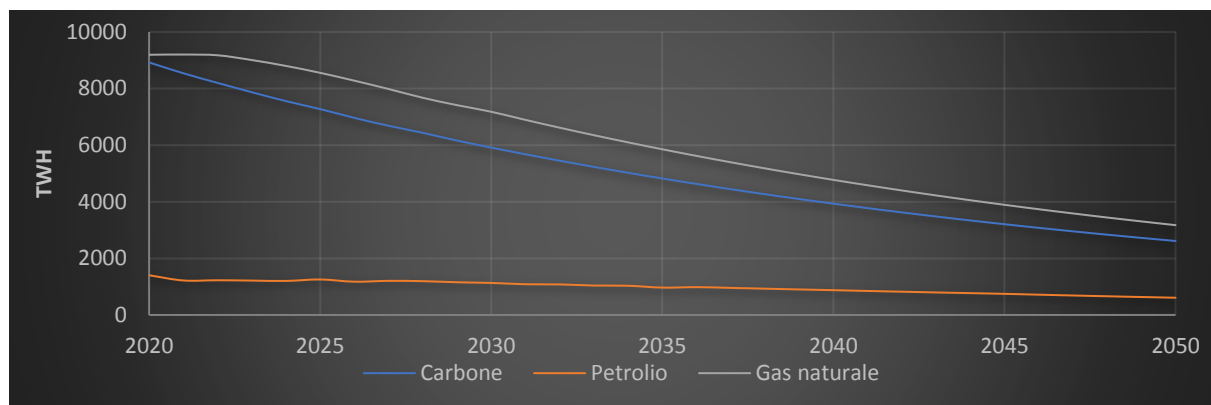


Figura 45: [Evoluzione della produzione di potenza da fonti fossili.](#)

Le fonti rinnovabili, includendo biomasse e rifiuti, presentano il tasso di crescita medio annuo più elevato nel parco di produzione di potenza, registrando +6,0% tra il 2020 ed il 2050. Questa crescita è guidata principalmente dall'eolico che passa da una produzione di 1280 TWh nel 2020 ad una produzione quasi nove volte maggiore nel 2050, pari a 11250 TWh, dopo aver raggiunto un picco di 11770 TWh nel 2045. La produzione idroelettrica, la maggiore fonte carbon-free nella generazione elettrica attuale, presenta invece una decrescita parziale tra il 2020 ed il 2035, periodo in cui si registra una diminuzione della produzione annua di circa 600 TWh, cui segue una ripresa significativa che culmina nel 2050 con il raggiungimento di 4360 TWh. Il fotovoltaico presenta, invece, una crescita quasi lineare sino al 2035, anno in cui fornisce ancora un contributo marginale, pari circa a 1000 TWh, cui segue una crescita esponenziale sino al raggiungimento di una produzione otto volte maggiore nel 2050. Per quanto concerne lo sfruttamento di biomasse e rifiuti, si annota un aumento significativo della produzione sino al 2030, in cui si giunge ad un picco di produzione di 2650 TWh, seguito da una parziale eliminazione graduale di questa fonte al 2050, anno in cui si attesta un minimo di produzione pari a 1170 TWh. La produzione di potenza attraverso fonti marina è quasi nulla sino al 2030, cui segue un periodo di grossa espansione sino al 2050, anno in cui si registra una produzione di circa 4000 TWh.

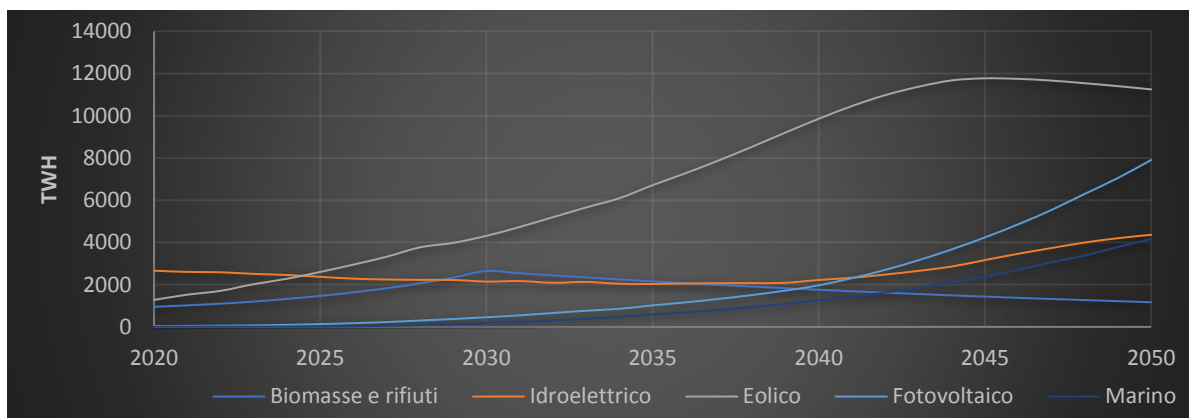


Figura 46: Evoluzione della produzione di potenza da fonti rinnovabili.

La produzione di potenza da fonte nucleare presenta un tasso medio di crescita annuale del 6,1% tra il 2020 ed il 2038, cui segue una decrescita parziale media di 2,6%. In particolare, la produzione di potenza triplica tra 2020 e 2038, passando da circa 4400 TWh a quasi 13000 TWh, per poi diminuire, a causa delle maggiori penetrazioni di fotovoltaico, idroelettrico e marino, a circa 9500 TWh.

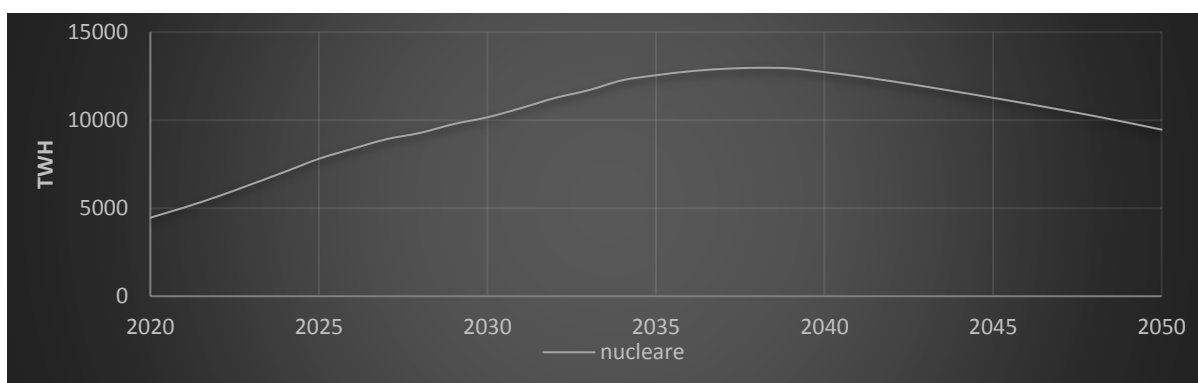


Figura 47: Evoluzione della produzione di potenza da fonte nucleare.

Analizzando la evoluzione del parco elettrico in funzione di una suddivisione più ampia delle fonti, si possono intuire le grosse trasformazioni a cui deve essere sottoposto il settore di produzione di potenza al fine di realizzare una decarbonizzazione efficace. In particolare, si nota che occorrerà passare dalla situazione attuale, in cui il settore di potenza riceve un contributo pari circa al 77% dalle fonti fossili, al raggiungimento di un mix perfettamente equipartito nel 2034 e alla realizzazione di un mix diametralmente opposto a quello iniziale nel 2050, anno in cui lo share delle rinnovabili è pari circa al 65%, quello del nucleare circa al 21% e le fonti fossili al 14%.

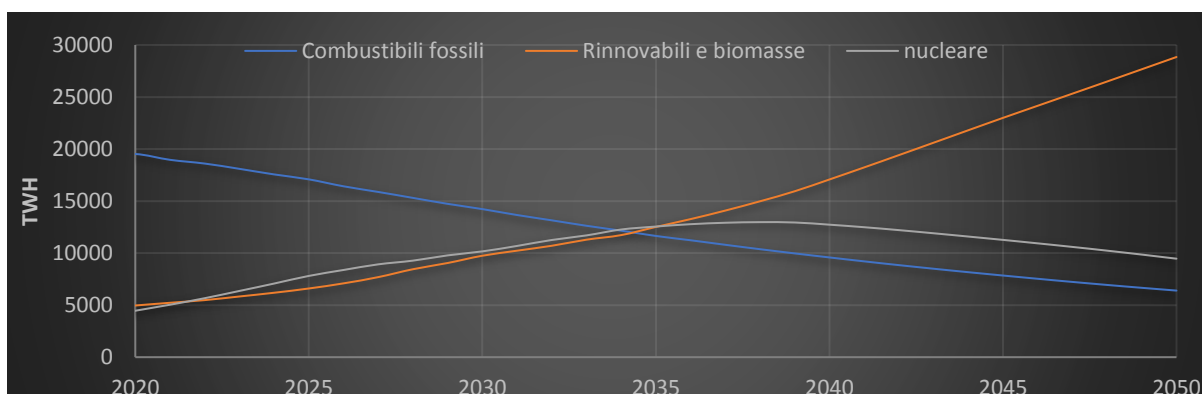


Figura 48: Evoluzione della produzione di potenza nei differenti macro-gruppi di fonti energetiche.

7.1.2-Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica

L'evoluzione delle emissioni di anidride carbonica riflettono le trasformazioni subite dal parco elettrico in questo intervallo di tempo. Complessivamente si registra una diminuzione delle emissioni totali significativa: si passa da circa 14400 Mt di anidride carbonica nel 2020 a 5600 Mt nel 2050.

In particolar modo, questa diminuzione è strettamente correlata alla graduale eliminazione del contributo di fonti fossili nel mix elettrico. Le emissioni riferite a ciascuna fonte vengono valutate utilizzando i valori di intensità emissiva forniti dall'International Energy Agency. Assumendo, quindi, che l'intensità emissiva del carbone sia unitaria, si ottiene una curva emissiva che è sostanzialmente uguale a quella di produzione di potenza. Nonostante il suo contributo nella produzione di potenza sia decresciuto significativamente, questa fonte impatta gravemente sulle emissioni nel 2050, anno in cui si registrano ancora circa 2600 MtCO₂ emesse. Il gas naturale, che presenta un'intensità emissiva pari circa alla metà di quello del carbone, fornisce un contributo emissivo molto più basso rispetto al carbone. Nello specifico, le emissioni da questa fonte diminuiscono più di due volte: si annota un passaggio da circa 4000 MtCO₂ ad inizio analisi a 1600 MtCO₂ nel 2050. Le emissioni relative all'utilizzo di petrolio si dimezzano passando da 1000 MtCO₂ a circa 480 MtCO₂ nel 2050.

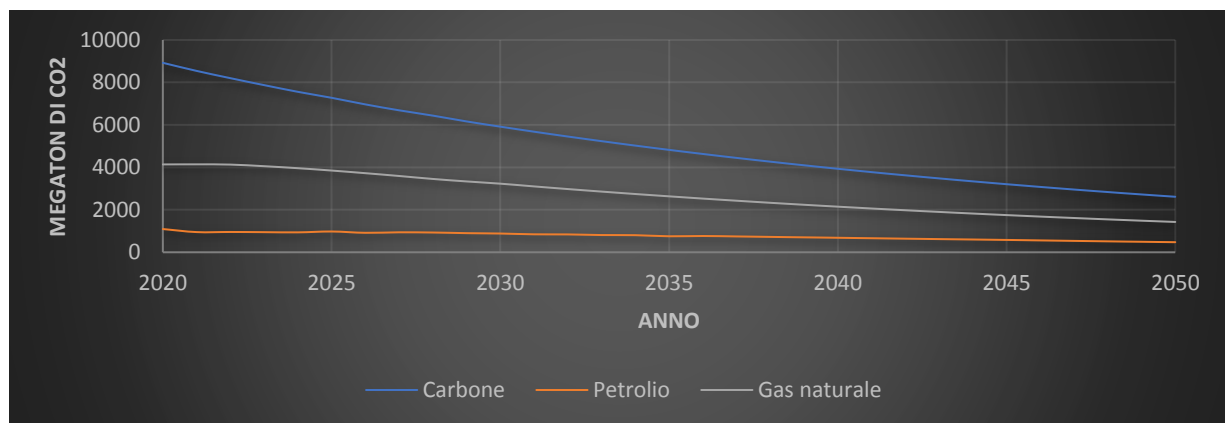


Figura 49: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte fossile.

Per quanto concerne le rinnovabili, le emissioni di CO₂ relative a queste fonti diventano più di sette volte maggiori tra 2020 e 2050, principalmente a causa dell'incremento dell'installazione di capacità eolica e fotovoltaica. In particolar modo, si registra una penetrazione esponenziale del fotovoltaico, che presenta il fattore emissivo maggiore tra le fonti rinnovabili, a partire dal 2020, che culmina con il raggiungimento di 250 MtCO₂ nel 2050. Le emissioni dell'eolico raggiungono un picco nel 2045 circa pari a 120 MtCO₂ per poi stabilizzarsi ad un valore di 110 MtCO₂ nel 2050. Le biomasse ed i rifiuti forniscono un contributo preponderante alle emissioni sino al 2030, anno in cui si registra un picco pari a circa 66 MtCO₂, cui segue una netta diminuzione sino al raggiungimento dei 30MtCO₂ nel 2050. L'idroelettrico presenta una diminuzione delle emissioni complessive, in linea con l'evoluzione della produzione di potenza, tra il 2020 ed il 2035, cui segue una forte ripresa ed il raggiungimento di un livello emissivo pari a 40 MtCO₂ nel 2050, valore quasi doppio del contributo iniziale. Infine, le emissioni relative alla fonte marina evolvono in maniera esponenziale, raggiungendo un quantitativo di emissioni pari a quello dell'idroelettrico nel 2050, avendo assunto per questa fonte un indice teorico emissivo di 0,010kgCO₂/kWh.

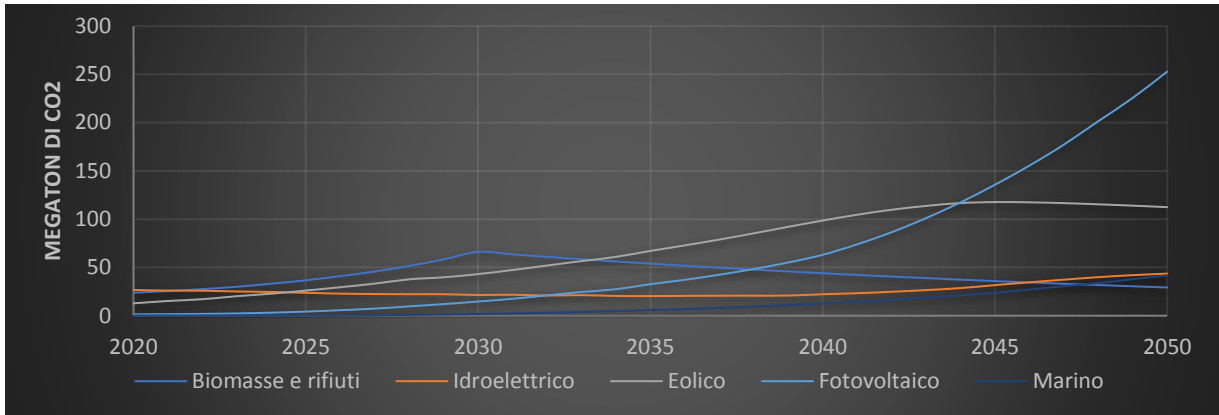


Figura 50: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonti rinnovabili.

Le emissioni relative del nucleare presentano la stessa curva a campana della produzione di potenza., si registra il raggiungimento di un picco nel 2038 pari a 840 MtCO₂, cui è seguito una netta diminuzione e la stabilizzazione a 600 MtCO₂ nel 2050.

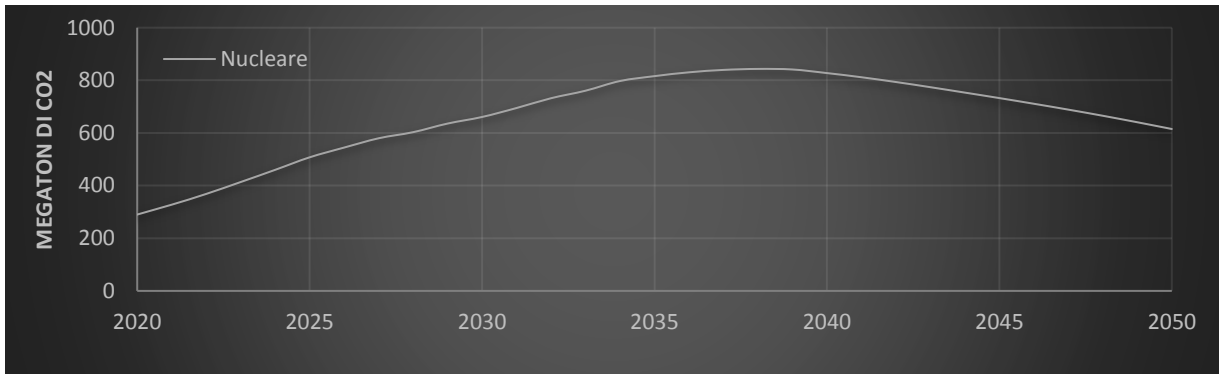


Figura 51: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare

In conclusione, paragonando le emissioni totali di anidride carbonica tra fonti rinnovabili, nucleare e fonti fossili, si deduce l'effettiva disparità emissiva di queste singole fonti: basti pensare che nonostante, nel 2034, la produzione di potenza è perfettamente equipartita tra queste tre fonti energetiche, le emissioni relative alle fonti fossili sono più di otto volte maggiori rispetto al contributo totale di fonti rinnovabili e nucleare. Nel 2050, quando le fonti fossili copriranno un ruolo marginale con uno share pari al 14%, le emissioni relative saranno comunque circa quattro volte maggiori del contributo delle fonti a basso contenuto di carbonio, causando un livello emissivo complessivo del parco elettrico pari a 0,125 kgCO₂/kWh. Una trasformazione del settore produttivo più rapida è necessaria al fine di raggiungere gli obiettivi di Parigi.

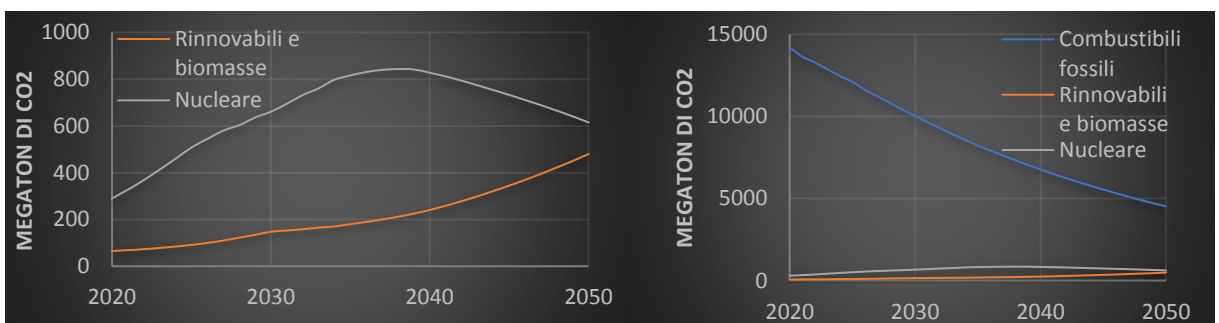


Figura 52: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare e rinnovabili (sinistra); Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza dei differenti gruppi macro-energetici (destra).

7.2-Potenziale tecnologico medio

7. 2.1-Evoluzione del parco elettrico

Assumendo, invece, che il potenziale tecnologico delle rinnovabili sia medio e che via via effettivamente uno sforzo internazionale atto a limitare le emissioni, si ottiene un'evoluzione del parco elettrico orientata verso l'opzione nucleare, ma con delle sostanziali differenze circa la produzione massima rispetto al caso precedente.

Per quanto riguarda le fonti fossili, valgono le stesse identiche considerazioni effettuate nel **paragrafo 7.1.1**. Le proiezioni WEO adottate forzano gli output relativi alle evoluzioni delle fonti fossili, permettendo di studiare il relativo contributo del nucleare in funzione del potenziale tecnologico delle rinnovabili.

Le fonti rinnovabili, includendo biomasse e rifiuti, presentano un tasso di crescita medio annuo pari a +6,3%, attestandosi, ancora una volta, la fonte energetica che presenta la variazione percentuale più elevata tra il 2020 ed il 2050. Analogamente al caso precedente, questa crescita è guidata principalmente dall'eolico che passa da una produzione iniziale di circa 1300 TWh ad una produzione pari a 20300 TWh, registrando quindi un aumento relativo annuo del 9,6%. La produzione idroelettrica presenta, invece, una decrescita media annua pari a -1,4% tra il 2020 ed il 2035, anno in cui raggiunge un minimo di circa 2360TWh, cui segue una ripresa significativa che culmina nel 2050 con il raggiungimento di 5200 TWh. Il fotovoltaico ricopre un ruolo marginale sino al 2035, anno in cui fornisce poco meno di 1000 TWh, per poi raggiungere un contributo pari a 5000 TWh nel 2050. La generazione da biomasse e rifiuti decresce costantemente in tutto l'intervallo di tempo considerato sino alla quasi totale eliminazione nel 2050. Il contributo del marino è pressoché trascurabile sino al 2030, cui segue un periodo di crescita stazionaria ed il raggiungimento di circa 2000 TWh di generazione nel 2050.

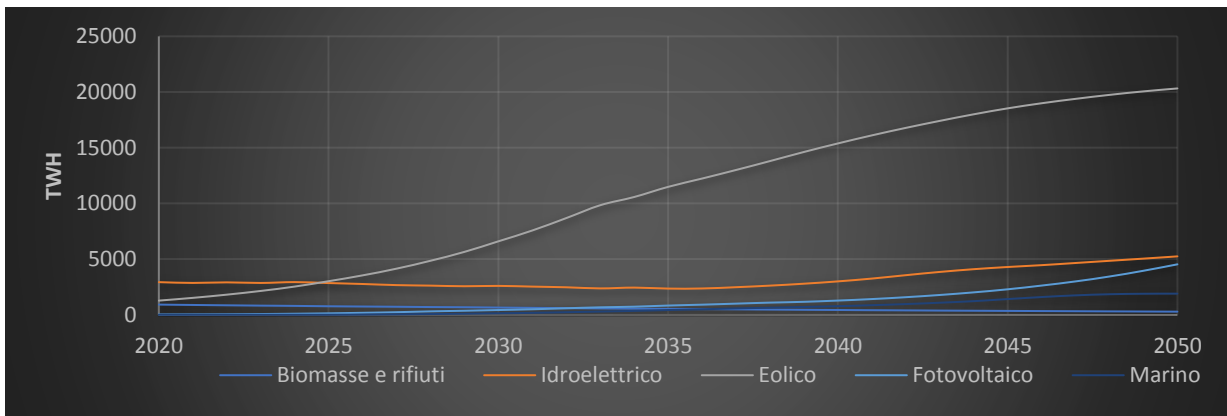


Figura 53: Evoluzione della produzione di potenza da fonti rinnovabili.

La produzione di potenza da fonte nucleare presenta un tasso medio di crescita significativo durante i primi dieci anni della simulazione: si annota che la produzione diventa più di due volte più grande e si raggiungono i 9500 TWh. Dopodiché si mantiene circa costante per i dieci anni successivi, per poi diminuire visibilmente e raggiungere i 6000 TWh nel 2050.

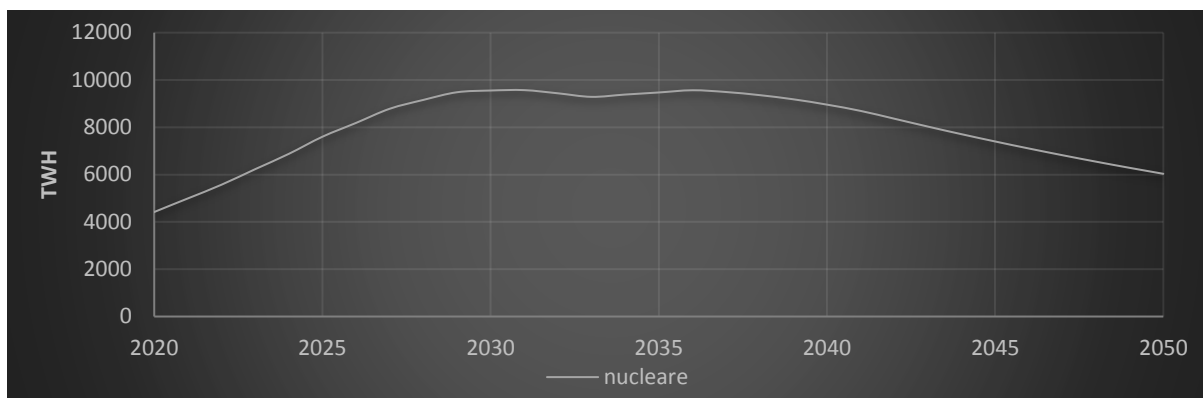


Figura 54: [Evoluzione della produzione di potenza da fonte nucleare.](#)

Valutando la panoramica del contributo delle singole macro-fonti, ci si accorge delle sostanziali differenze del risultato ottenuto rispetto al caso precedente. In particolare, non è possibile annotare una situazione in cui vi sia una perfetta suddivisione del parco elettrico tra queste macro-fonti. Lo share massimo del nucleare, pari al 28% circa, si verifica nel 2029, anno in cui le fossili contribuiscono al 44% e le rinnovabili alla parte rimanente. Nel 2050, il parco elettrico è costituito da un contributo preponderante delle rinnovabili, pari al 73%, e dallo stesso contributo di fonti fossili e nucleare, ciascuno pari a 13,5%.

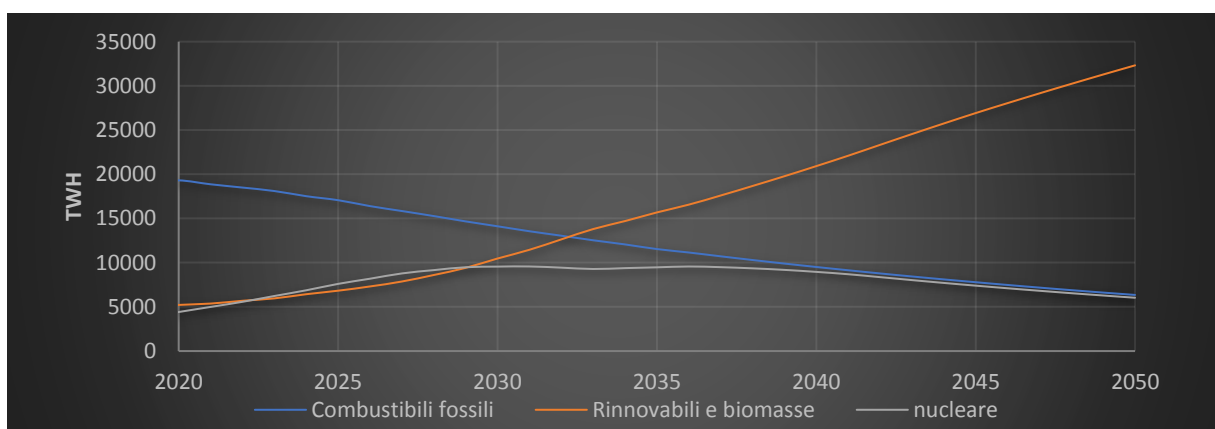


Figura 55: [Evoluzione della produzione di potenza nei differenti macro-gruppi di fonti energetiche.](#)

7.1.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica

L'evoluzione delle emissioni di anidride carbonica riflettono le trasformazioni subite dal parco elettrico in questo intervallo di tempo. Complessivamente si registra una diminuzione delle emissioni totali significativa: si passa da 14400 Mt di anidride carbonica nel 2020 a 5300 Mt nel 2050.

Riportando le stesse assunzioni effettuate nel **paragrafo 7.1.2**, si possono riportare le medesime considerazioni circa l'evoluzione delle emissioni di fonti fossili, in quanto le variazioni relative alla produzione di potenza sono quasi trascurabili, e gli stessi indici emissivi associati a ciascuna fonte energetica.

Per quanto riguarda le rinnovabili, le emissioni di anidride carbonica aumentano significativamente anche in questo caso a causa delle emissioni di fotovoltaico ed eolico. La maggiore penetrazione dell'eolico comporta il raggiungimento di un livello emissivo nel 2050 quasi doppio del caso a basso potenziale. Il fotovoltaico contribuisce all'emissione di 150 MtCO₂ nel 2050 a causa della parziale sostituzione di questa fonte con l'eolico. L'idroelettrico presenta una diminuzione delle emissioni complessive, in linea con l'evoluzione della produzione di potenza, tra il 2020 ed il 2035, cui segue

una forte ripresa ed il raggiungimento di un livello emissivo pari a 50 MtCO₂ nel 2050. Il contributo emissivo relativo all'utilizzo di biomasse e rifiuti diventa quasi nullo a causa della eliminazione graduale di questa fonte dal parco energetico. Infine, la scarsa penetrazione del marino comporta un livello di emissioni nel 2050 basso, attestato a circa 20 MtCO₂.

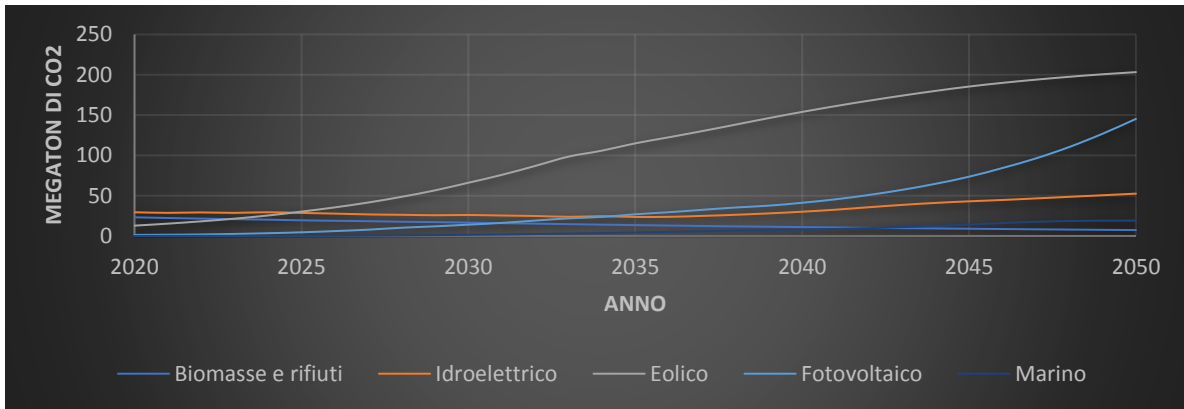


Figura 56: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonti rinnovabili.

Per quanto concerne le emissioni di anidride carbonica da generazione nucleare, si registrano due picchi differenti, uno nel 2030 e l'altro nel 2036, entrambi con un livello di emissioni pari a 620 Mt. Infine, si annota una diminuzione netta delle emissioni ed il raggiungimento dei 400 MtCO₂ nel 2050.

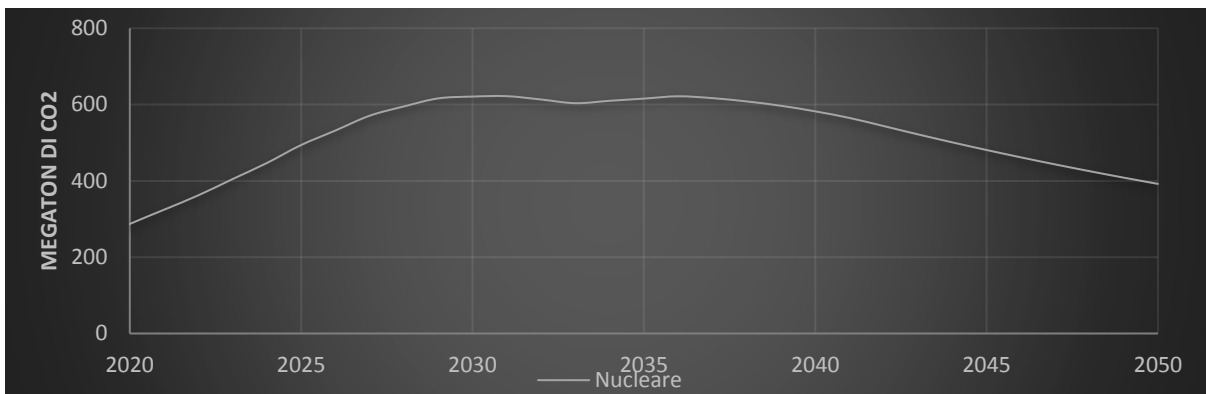


Figura 57: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare

In conclusione, paragonando le emissioni totali di anidride carbonica tra fonti rinnovabili, nucleare e fonti fossili, si nota che le emissioni di fonti fossili sono ancora significativamente più elevate, mentre le emissioni di rinnovabili superano quelle del nucleare nel 2050. Si registra un indice emissivo del parco elettrico nel 2050 pari a 0,118 kgCO₂/kWh.

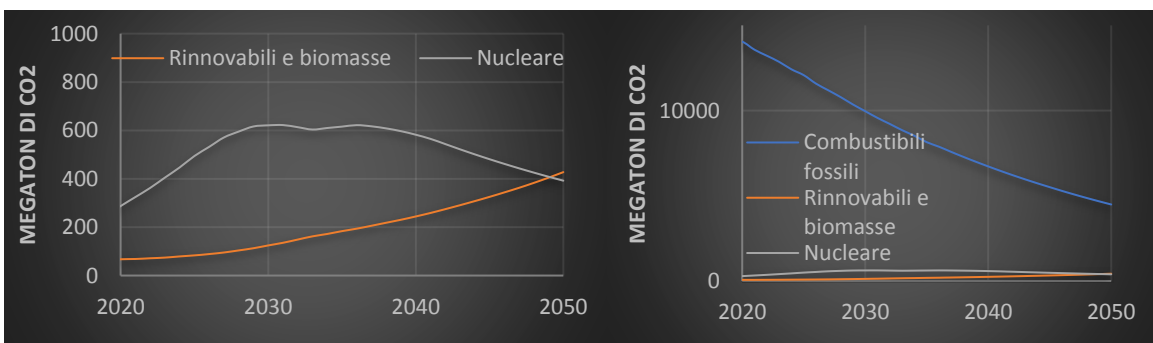


Figura 58: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare e rinnovabili (sinistra); Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza dei differenti gruppi macro-energetici.

7.3-Potenziale tecnologico elevato

7.3.1-Evoluzione del parco elettrico

Considerando un potenziale tecnologico delle rinnovabili elevato e che via sia effettivamente uno sforzo internazionale atto a limitare le emissioni, si ottiene un'evoluzione del parco elettrico scarsamente orientato verso l'opzione nucleare.

Per quanto concerne l'evoluzione delle fonti fossili, valgono le stesse identiche considerazioni effettuate nel **paragrafo 7.1.1**. Le proiezioni WEO adottate forzano gli output relativi alle evoluzioni delle fonti fossili, permettendo di studiare il relativo contributo del nucleare in funzione del potenziale tecnologico delle rinnovabili.

Le fonti rinnovabili, includendo biomasse e rifiuti, presentano il tasso di crescita medio annuo più elevato nel parco di produzione di potenza. Analogamente ai casi precedenti, questa crescita è guidata principalmente dall'eolico che passa da una produzione iniziale di circa 1300 TWh ad una produzione pari a 28000 TWh nel 2050. La produzione idroelettrica presenta, invece, un andamento pressoché costante pari a 3500 TWh, sebbene si verifichi una parziale diminuzione iniziale. La generazione da biomasse e rifiuti decresce costantemente in tutto l'intervallo di tempo considerato sino alla quasi totale eliminazione nel 2050. Il marino ed il fotovoltaico producono un contributo pressoché marginale in tutto l'intervallo di tempo, raggiungendo una generazione complessiva pari circa a 2000 TWh nel 2050, cui contribuisce per circa tre quarti il fotovoltaico e la restante parte è compensata dal marino.

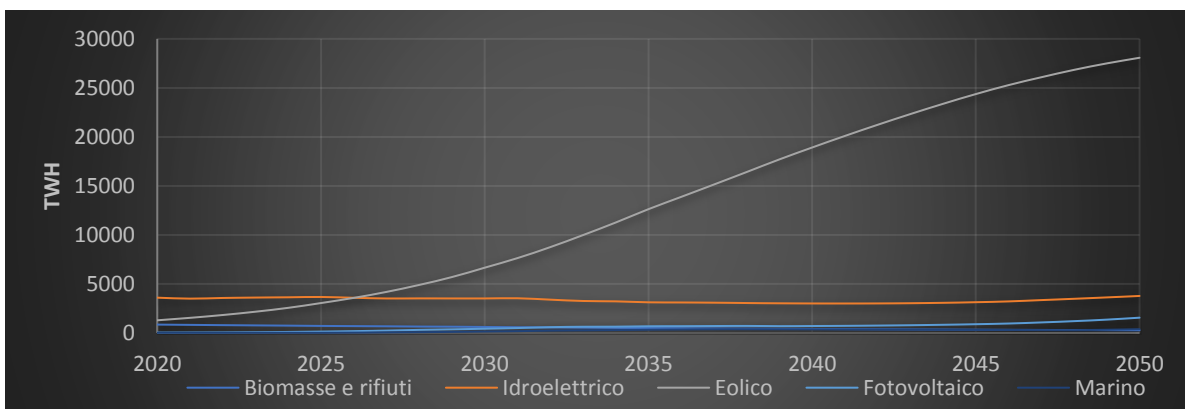


Figura 59: Evoluzione della produzione di potenza da fonti rinnovabili.

L'evoluzione della produzione di potenza nucleare mostra una penetrazione significativa di questa fonte sino al 2030, anno in cui si registra un massimo di 9000 TWh, cui segue una diminuzione rapida che porta ad un livello di produzione uguale a quello di partenza, pari circa a 4300 TWh.

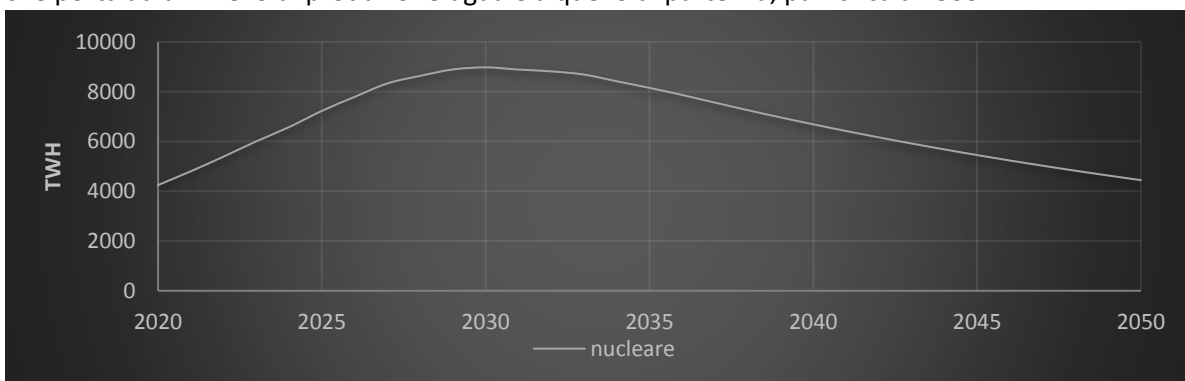


Figura 60: Evoluzione della produzione di potenza da fonte nucleare.

Valutando la panoramica del contributo delle singole macro-fonti, è possibile notare come l'assunzione di un elevato potenziale tecnologico delle rinnovabili abbia causato una diminuzione graduale del nucleare anticipata. In particolare, si nota che a differenza dei due casi precedenti il contributo nucleare non eguaglia mai quello delle fossili.

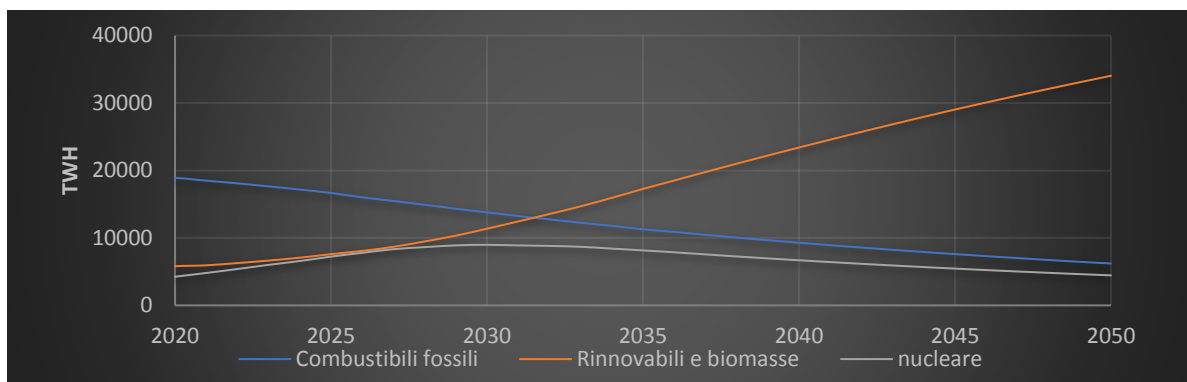


Figura 61: Evoluzione della produzione di potenza nei differenti macro-gruppi di fonti energetiche.

7.3.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica

L'evoluzione delle emissioni di anidride carbonica riflettono le trasformazioni subite dal parco elettrico in questo intervallo di tempo. Complessivamente si registra una diminuzione delle emissioni totali significativa: si passa da 14400 Mt di anidride carbonica nel 2020 a circa 5100 Mt nel 2050.

Riportando le medesime assunzioni effettuate nel **paragrafo 7.1.2**, si possono riportare le stesse considerazioni circa l'evoluzione delle emissioni di fonti fossili, in quanto le variazioni relative alla produzione di potenza sono quasi trascurabili, e gli stessi indici emissivi associati a ciascuna fonte energetica.

Per quanto riguarda le rinnovabili, le emissioni di anidride carbonica aumentano significativamente a causa delle emissioni dell'eolico. In particolare, le emissioni relative a questa fonte crescono abbondantemente fino a raggiungere un livello emissivo nel 2050 quasi venti volte maggiore del valore iniziale, passando da 15 a 280 MtCO₂ nel 2050. Il fotovoltaico e l'idroelettrico forniscono un contributo pari rispettivamente a 50 e 40 MtCO₂ nel 2050, in linea con l'evoluzione della produzione di potenza. Il contributo emissivo medio relativo all'utilizzo di biomasse e rifiuti è circa uguale a 10 MtCO₂. Infine, le emissioni relative alla fonte marina non forniscono un contributo significativo al parco emissivo complessivo.

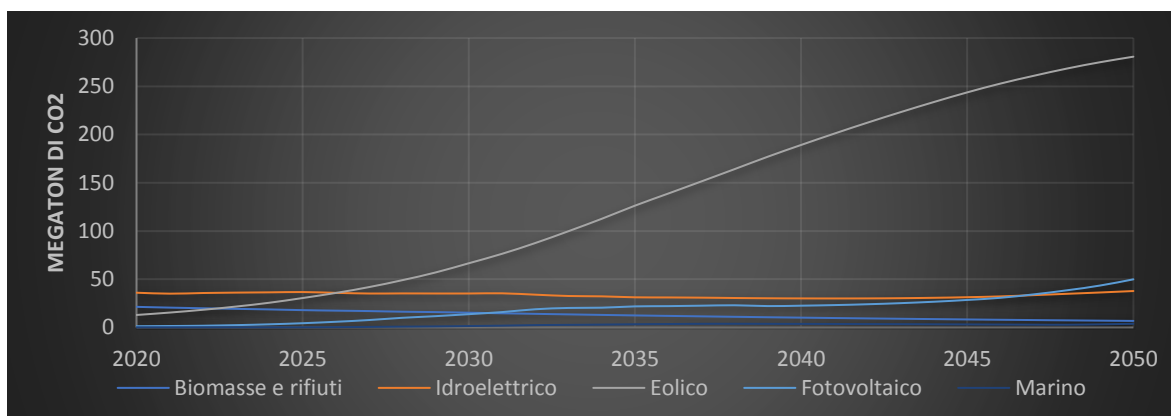


Figura 62: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte fossile.

Per quanto concerne le emissioni di anidride carbonica da generazione nucleare, si registrano un picco nel 2030, pari circa a 580 Mt, cui segue una netta diminuzione ed il raggiungimento dei 300 MtCO₂ nel 2050.

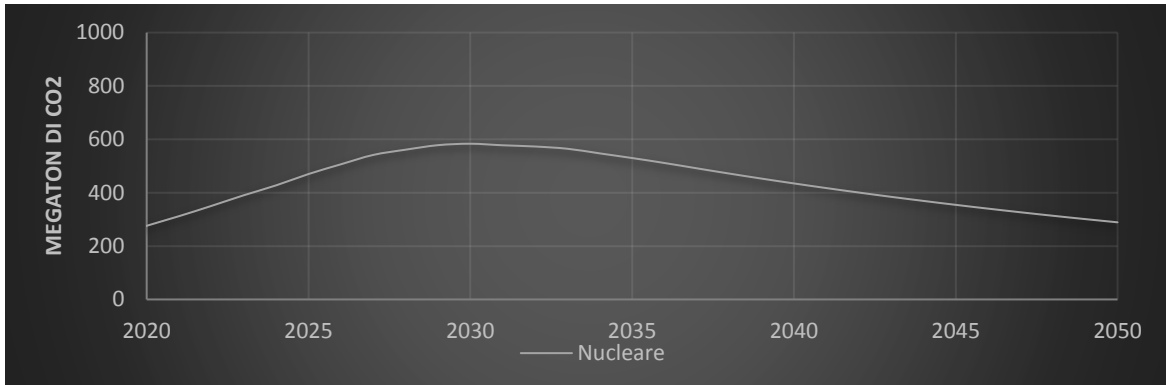


Figura 63: [Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare](#)

In conclusione, paragonando le emissioni totali di anidride carbonica tra fonti rinnovabili, nucleare e fonti fossili, si nota che le emissioni di fonti fossili sono ancora significativamente più elevate, mentre le emissioni di rinnovabili superano quelle del nucleare nel 2046. Si calcola un indice emissivo del parco elettrico nel 2050 pari a 0,113 kgCO₂/kWh.

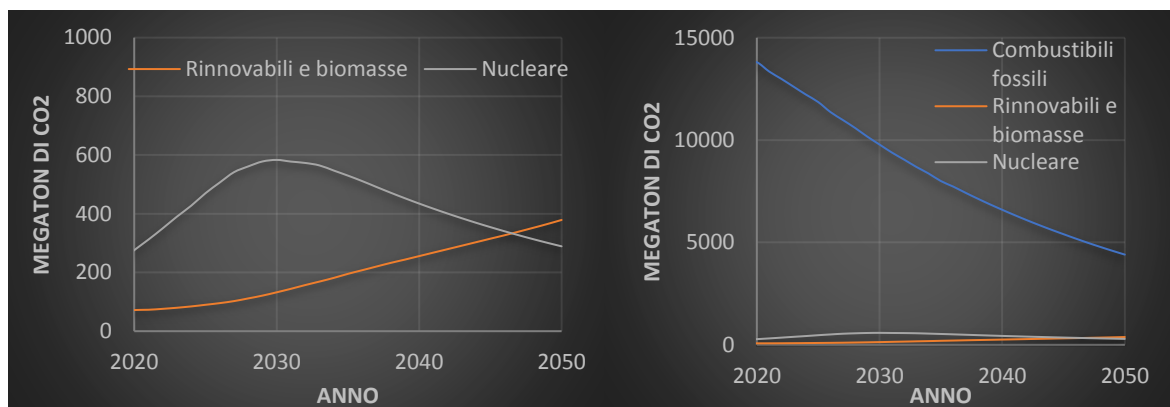


Figura 64: [Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare e rinnovabili \(sinistra\); Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza dei differenti gruppi macro-energetici.](#)

7.4-Irruzione tecnologica

7.4.1-Evoluzione del parco elettrico

Considerando che vi sia un'irruzione tecnologica delle rinnovabili e che vi sia effettivamente uno sforzo internazionale atto a limitare le emissioni, si ottiene un'evoluzione del parco elettrico che presenta una parziale eliminazione del nucleare.

Per quanto concerne l'evoluzione delle fonti fossili, valgono le stesse identiche considerazioni effettuate nel **paragrafo 7.1.1**. Le proiezioni WEO adottate forzano gli output relativi alle evoluzioni delle fonti fossili, permettendo di studiare il relativo contributo del nucleare in funzione del potenziale tecnologico delle rinnovabili.

Le fonti rinnovabili, includendo biomasse e rifiuti, presentano un tasso di crescita medio che presenta la variazione percentuale più elevata tra il 2020 ed il 2050. Analogamente a tutti i casi precedenti, questa crescita è guidata principalmente dall'eolico che passa da una produzione iniziale di circa

1300 TWh ad una produzione pari a 31500 TWh, registrando quindi un aumento relativo annuo del 11,3%. La produzione idroelettrica raddoppia tra il 2020 ed il 2035, anno in cui raggiunge un massimo pari a circa 12300TWh, cui segue una diminuzione significativa che culmina nel 2050 con il raggiungimento di circa 6400 TWh. A causa delle mancate limitazioni del potenziale tecnologico delle rinnovabili, l’algoritmo economico applicato comporta che le produzioni fotovoltaica, marina e delle biomasse, caratterizzate da un LCOE maggiore rispetto all’eolico e all’idroelettrico, siano pressoché nulle in tutto l’intervallo di tempo considerato.

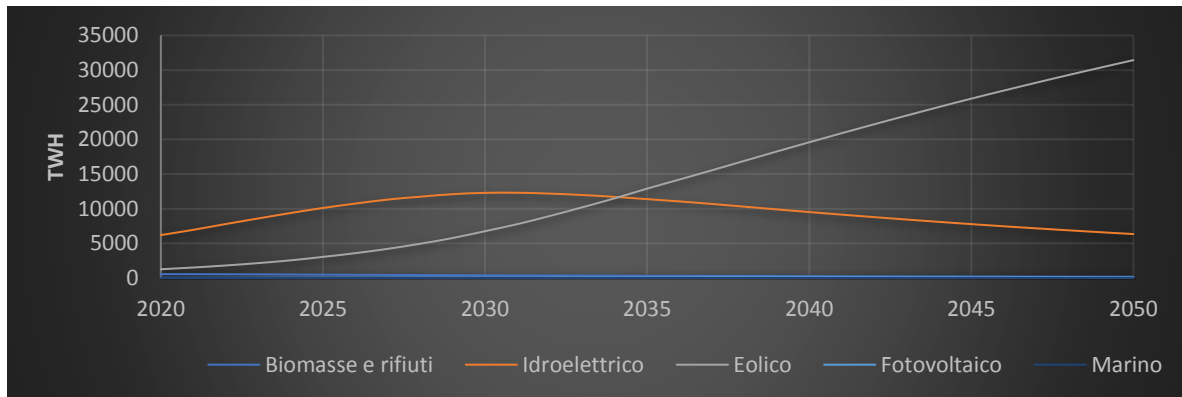


Figura 65: Evoluzione della produzione di potenza da fonti rinnovabili.

La produzione di potenza da fonte nucleare diminuisce significativamente nell’intervallo di tempo considerato, riflettendo, quindi, una parziale eliminazione di questa fonte dal parco elettrico internazionale. In particolare, si registra un tasso di diminuzione medio annuale pari al 5% ed il raggiungimento di una produzione di circa 1300 TWh nel 2050.

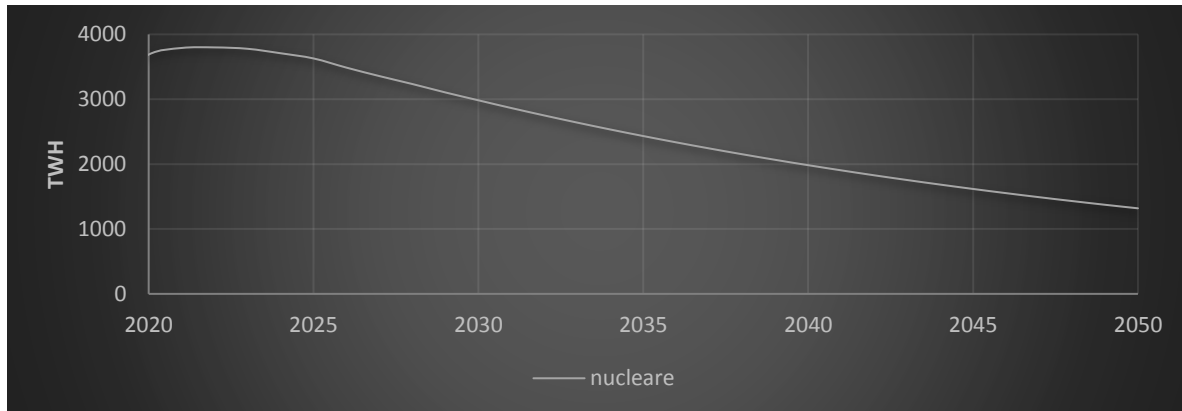


Figura 66: Evoluzione della produzione di potenza da fonte nucleare.

Valutando la panoramica del contributo delle singole macro-fonti, è possibile evincere quale debba essere l’evoluzione della produzione rinnovabili nell’eventuale abbandono del ricorso al nucleare. In particolare, si nota che, al fine di raggiungere una parziale decarbonizzazione del sistema elettrico, la produzione da fonti rinnovabili debba eguagliare già nel 2025 la produzione fossile e raggiungere circa 38000 TWh di produzione complessiva alla fine della simulazione. Nel 2050, il parco elettrico è costituito da un contributo preponderante delle rinnovabili, pari all’85,4%, da un contributo di fonti fossili pari all’11,7% e dal 2,9% di produzione nucleare.

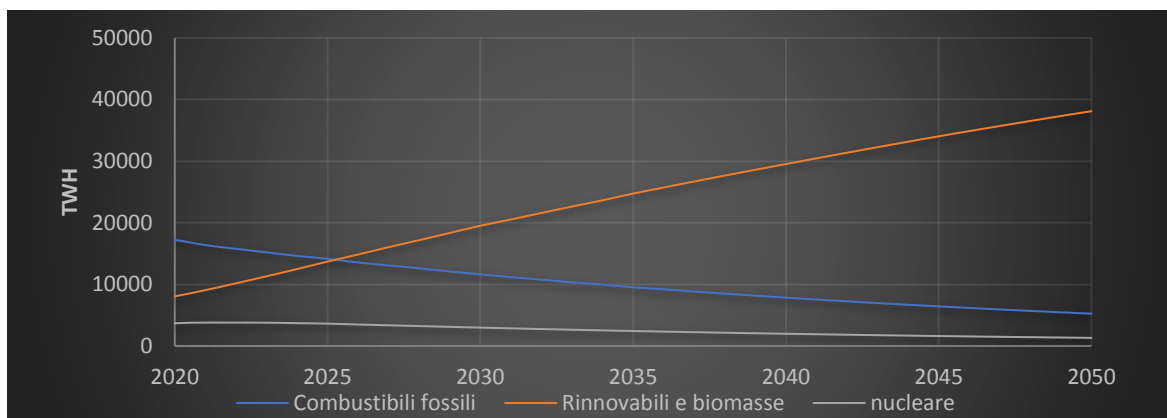


Figura 67: Evoluzione della produzione di potenza nei differenti macro-gruppi di fonti energetiche.

7.4.2- Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica

L'evoluzione delle emissioni di anidride carbonica riflettono le trasformazioni subite dal parco elettrico in questo intervallo di tempo. Complessivamente si registra una diminuzione delle emissioni totali significativa: si passa da circa 14400 Mt di anidride carbonica nel 2020 a 4350 Mt nel 2050.

Riportando le stesse assunzioni effettuate nel **paragrafo 7.1.2**, si possono riportare le stesse considerazioni circa l'evoluzione delle emissioni di fonti fossili, in quanto le variazioni relative alla produzione di potenza sono quasi trascurabili, e gli stessi indici emissivi associati a ciascuna fonte energetica.

Per quanto riguarda le rinnovabili, le emissioni di anidride carbonica aumentano significativamente anche in questo caso a causa delle emissioni dell'eolico. In particolar modo, le emissioni relative a questa fonte crescono in maniera significativa passando da 12 MtCO₂ a più di 300 MtCO₂ nel 2050. Per quanto concerne l'idroelettrico, l'evoluzione delle emissioni riflette l'evoluzione di produzione di potenza: si raggiunge un pico emissivo nel 2030, pari circa a 120 MtCO₂, cui segue una diminuzione ed il raggiungimento di circa 60 MtCO₂ nel 2050. Il contributo emissivo di fotovoltaico, marino, biomasse e rifiuti è pressoché trascurabili.

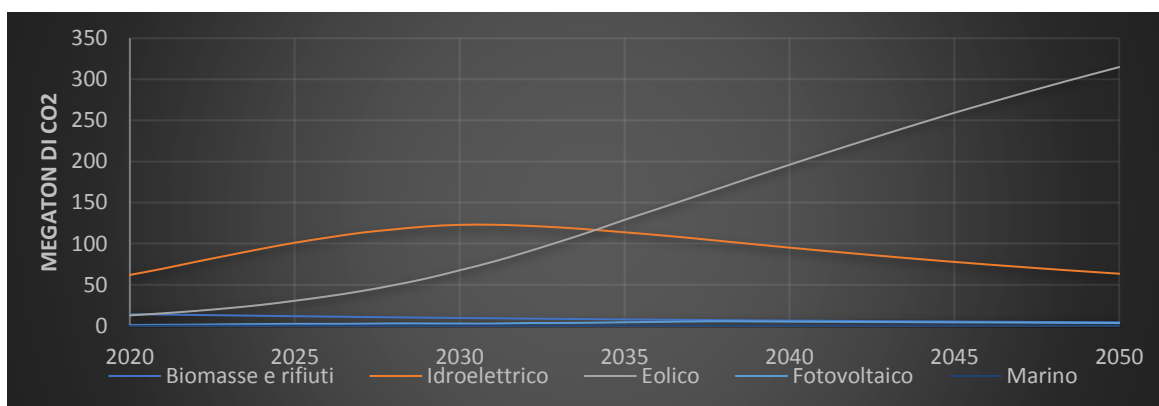


Figura 68: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte fossile.

Per quanto riguarda le emissioni di anidride carbonica da generazione nucleare, si registra un andamento pressoché costante nei primi cinque anni di simulazione, cui segue una diminuzione graduale ed il raggiungimento di circa 85 MtCO₂ nel 2050.

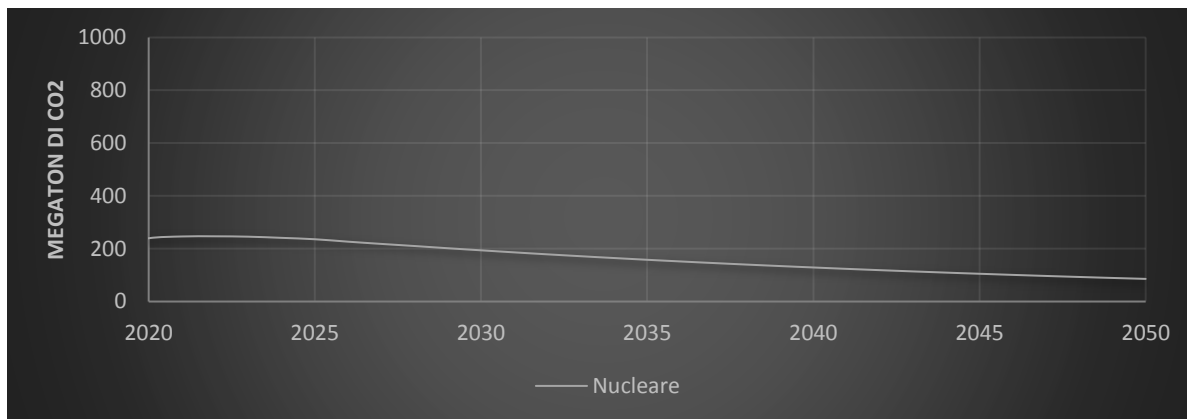


Figura 69: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare

In conclusione, paragonando le emissioni totali di anidride carbonica tra fonti rinnovabili, nucleare e fonti fossili, si nota che le emissioni di fonti fossili sono ancora significativamente più elevate, mentre le emissioni di rinnovabili superano quelle del nucleare già nel 2030. Si registra un indice emissivo del parco elettrico nel 2050 pari a 0,097 kgCO₂/kWh.

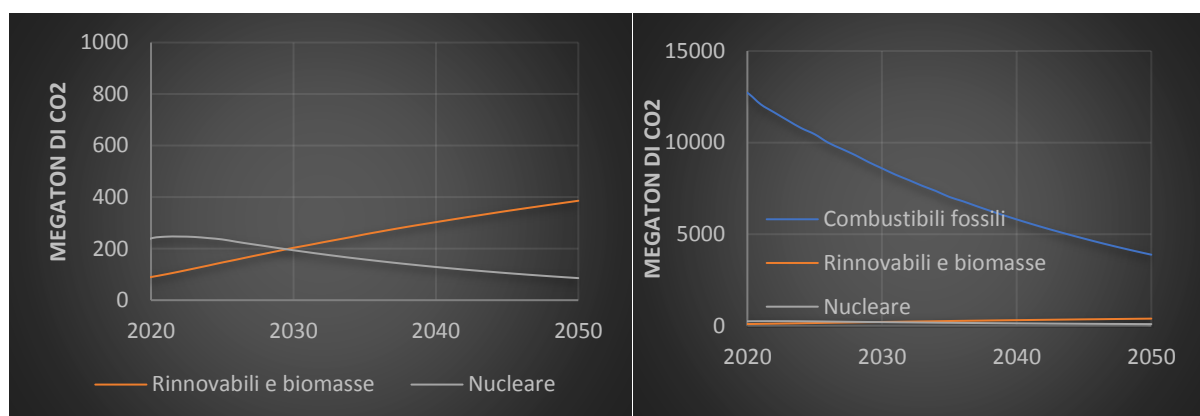


Figura 70: Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza da fonte nucleare e rinnovabili (sinistra); Evoluzione delle emissioni di anidride carbonica nel settore di produzione di potenza dei differenti gruppi macro-energetici.

7.5-Analisi del contributo nucleare

7.5.1-Analisi della capacità nucleare installata futura

I risultati ottenuti nelle simulazioni effettuate si riferiscono unicamente alla generazione elettrica di ciascuna fonte. Al fine di comprendere quale siano le effettive trasformazioni che debba subire il parco elettrico affinché si raggiungano questi livelli di produzione, occorre effettuare un'analisi della capacità installata.

Il fattore di capacità medio è il rapporto tra l'energia effettivamente prodotta da un impianto di produzione di potenza in un dato periodo di tempo e la produzione massima teorica, ossia la generazione relativa ad un funzionamento continuo alla potenza nominale. Utilizzando le stime del fattore di capacità medio globale riportate dalla World Nuclear Association [28], è possibile valutare la capacità nucleare installata come segue:

$$C_{nuc} = \frac{E_{el,nuc}}{CF \cdot 8760} [W] \quad (7.1)$$

In cui:

- C_{nuc} è la capacità nucleare installata equivalente [W]
- $E_{el,nuc}$ è la generazione elettrica nucleare ottenuta nelle simulazioni [Wh]
- CF è il fattore di capacità medio globale, assunto pari a 78,9 [%]

Le precedenti considerazioni portano ad ottenere, negli scenari a *basso, medio ed elevato potenziale tecnologico*, un aumento significativo della capacità nucleare installata nel periodo 2020-2050, che raggiunge dei picchi rispettivamente pari circa a 1821 GW, 1367 GW e 1284 GW; mentre nello scenario *irruzione tecnologica* si verifica un aumento meno considerevole con il raggiungimento di una capacità installata massima pari a 519 GW.

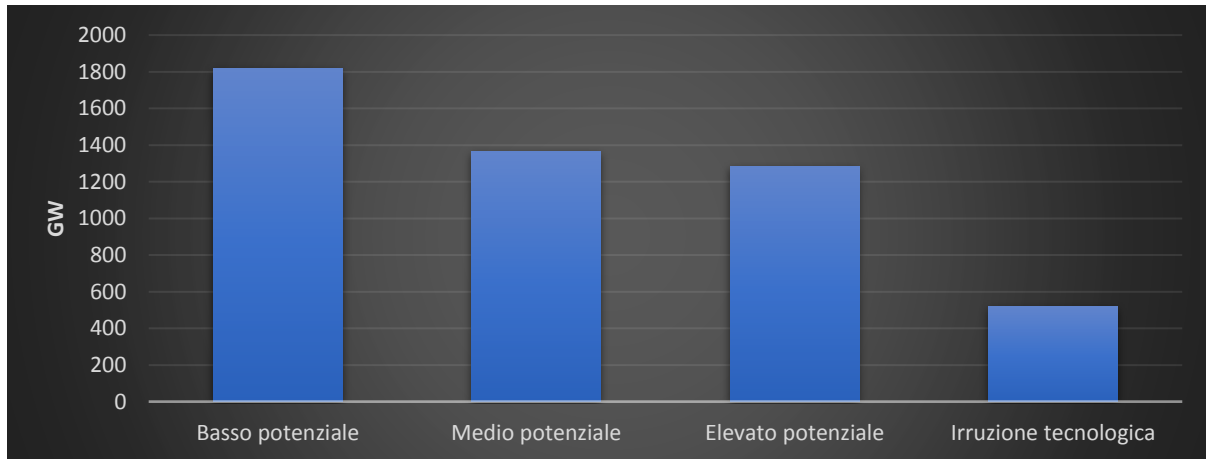


Figura 71: Capacità nucleare massima installata per i differenti scenari. In figura si riporta la massima capacità nucleare installata, espressa in GW, ottenuta attraverso l'utilizzo della formula del fattore di capacità medio e della generazione elettrica nucleare ottenuta dalle differenti simulazioni effettuate.

7.5.2-Investimenti nel settore nucleare

Gli aspetti economici dei nuovi impianti nucleari sono governati dal costo del capitale. Nelle valutazioni della nuova capacità installata, si nota come il costo del capitale totale, quindi compreso degli oneri finanziari, possa costituire fino all'85% del costo livellato dell'energia. Al fine di effettuare delle valutazioni di tipo economico, è possibile utilizzare i coefficienti di costo più recenti forniti dalla IEA e dalla NEA [36].

| Country | Technology | Overnight cost A | | Investment cost B | |
|----------------------|------------|------------------|-------|-------------------|-------|
| | | 1998 | 2015 | 1998 | 2015 |
| Europe | | | | | |
| Finland | BWR | 2 256 | | 2 672 | |
| | PWR (EPR) | | 4 896 | | 6 959 |
| France | PWR | 1 636 | | 2 280 | |
| | PWR (EPR) | | 5 067 | | 7 202 |
| East Asia | | | | | |
| Japan | BWR | 2 521 | | 3 146 | |
| | ABWR | | 3 883 | | 5 519 |
| South Korea | PWR | 1 637 | | 2 260 | |
| | ALWR | | 2 021 | | 2 580 |
| North America | | | | | |
| USA | PWR | 1 441 | 4 100 | 2 065 | 5 828 |

Figura 72: Costo del capitale stimato di un impianto nucleare in \$/kW. Si riporta l'evoluzione del costo del capitale non attualizzato e del capitale con oneri finanziari valutati con un tasso del 10% tra il 1998 ed il 2015. **Fonte: IEA&NEA, Projected Cost of Generating Cost of Electricity 2015 Edition**

Ipotizzando che la capacità attuale rimanga costante durante tutto il periodo di simulazione, è possibile calcolare gli investimenti nei nuovi impianti nucleari come segue:

$$I = c_{inv} * (C_{nuc,max} - C_{nuc,att}) [\$] \quad (7.2)$$

In cui:

- I è l'investimento necessario per la costruzione di un nuovo impianto nucleare [€]
- c_{inv} è il costo di investimento specifico [€/W]
- C è la capacità nucleare installata [W]
- I pedici nuc,max e nuc,att indicano rispettivamente la massima capacità nucleare futura e quella attuale

Tabella 4: Investimenti nei nuovi impianti nucleari per i differenti scenari di riferimento. Gli investimenti, riportati in G€, sono riferiti a differenti range di costi di investimenti specifici, attualizzati con un tasso di interesse del 10%, riportati in Figura 72. In particolare modo, si nota che l'utilizzo dei costi specifici asiatici conduca ad una netta riduzione del costo di capitale iniziale; mentre l'adozione dei costi specifici europei implica una levitazione degli investimenti iniziali.

| Scenario di riferimento | Costo di investimento specifico [€/kW] | Capacità aggiuntiva ($C_{nuc,max} - C_{nuc,att}$) [GW] | Costo di Investimento [G€] |
|------------------------------|--|--|----------------------------|
| Basso potenziale | 2580-7202 | 1419 | 3661-10220 |
| Medio potenziale | 2580-7202 | 965 | 2490-6949 |
| Elevato potenziale | 2580-7202 | 882 | 2276-6352 |
| Irruzione tecnologica | 2580-7202 | 117 | 302-843 |

A causa dell'età media avanzata della flotta nucleare attuale dei paesi più sviluppati, occorre considerare anche i costi per implementare la vita media di questi impianti. La capacità nucleare diminuisce più di due terzi tra il 2018 ed il 2040, passando da circa 280 GW a 90 GW. La diminuzione maggiore della capacità nucleare avviene in Europa, in cui si verifica una diminuzione di circa 100 GW nel 2050. In particolare, solo quindici dei reattori attualmente operativi rimarrebbe funzionante, a cui occorre aggiungere i quattro attualmente in costruzione. Sebbene questa diminuzione sia meno significativa negli Stati Uniti a causa delle recenti implementazioni di vita media effettuate su quasi tutti i reattori esistenti, si registra, comunque, una diminuzione pari a 50 GW nel 2050.

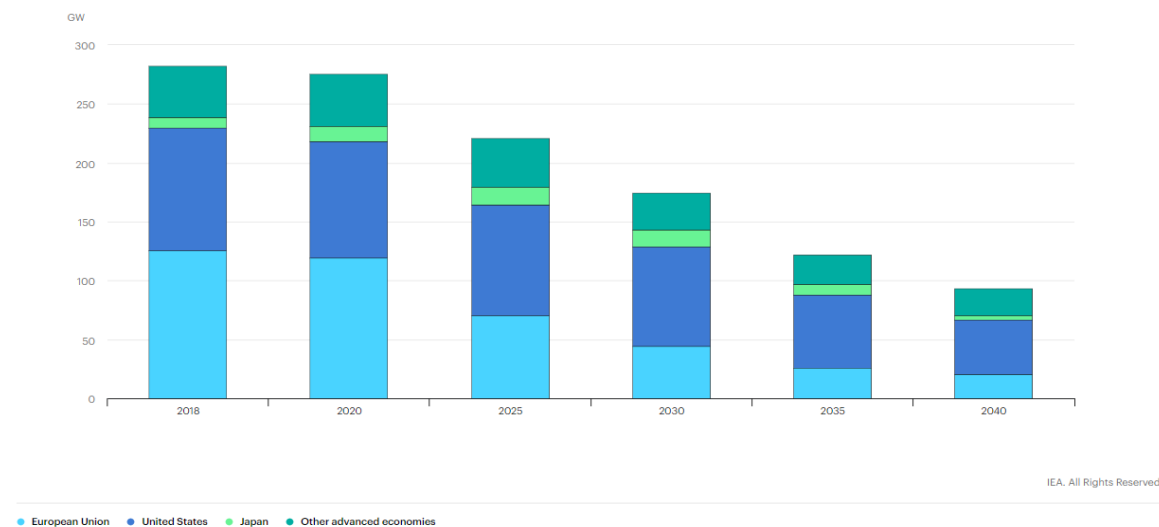


Figura 73: Nuclear Fade Case nelle economie più avanzate. In questo caso studio vengono considerati 13 paesi: Bulgaria, Canada, Repubblica Ceca, Finlandia, Francia, Ungheria, Giappone, Corea, Messico, Repubblica Slovacca, Turchia, Regno Unito e Stati Uniti. In figura, si riporta la diminuzione di capacità in assenza di estensione della vita media e nuovi progetti tra il 2018 ed il 2040. **Fonte: IEA, Nuclear Power in a Clean Energy System**

Considerando la diminuzione di capacità ed il costo specifico medio di implementazione della vita media descritti nel *Nuclear Fade Case* della IEA [31], è possibile stimare gli investimenti addizionali medi necessari a mantenere la capacità attuale esistente come segue:

$$I_{add} = \sum \frac{c_{impl}}{10} * \Delta C_{nuc} * anni_{impl} \quad [\$] \quad (7.3)$$

In cui:

- c_{impl} è il costo di implementazione di vita media di dieci anni e varia tra 0,5 e 1 G\$
- ΔC_{nuc} è la variazione di capacità quinquennale riportata nel *Nuclear Fade Case*
- $anni_{impl}$ è il numero di anni di implementazione per mantenere la capacità attuale sino al 2050

Utilizzando l'**equazione (7.3)**, gli investimenti addizionali per implementare la vita media della flotta nucleare esistente dei paesi economicamente più avanzati varia tra 190-380 G\$. Come si poteva facilmente evincere, i processi di estensione della vita media sono molto più vantaggiosi economicamente rispetto alla costruzione di nuovi impianti.

7.5.3- Le possibili riduzioni dei costi di investimento e generazione

Le valutazioni economiche riportate nel **paragrafo 7.5.2**, mostrano che la competitività dell'opzione nucleare e l'effettivo ricorso a questa fonte è strettamente correlato ai costi di capitale iniziale e al loro impatto sul costo di generazione effettivo. Le possibili riduzioni dei costi di investimento e generazione coinvolgono sia iniziative dipendente dall'industria nucleare stessa, quali l'incremento dell'efficienza nucleare, nuovi programmi costruttivi e una maggiore sicurezza, sia iniziative politiche e governative.

Per quanto concerne l'introduzione di nuovi programmi costruttivi e migliorie dell'efficienza nucleare, è possibile citare i recenti studi sui reattori modulari di piccola taglia. Gli Small Modular Reactors sono caratterizzati da una capacità elettrica media di 300 MW e da un design che garantisce una costruzione modulare. Il vantaggio principale è legato ai minori tempi costruttivi che comporta costi specifici di investimento molto più bassi degli attuali reattori attuali e costi livellati dell'energia futuri minori.

Si sta maturando l'idea di spostare la linea di produzione dal sito di utilizzo ad una vera e propria industria nucleare, garantendo così una maggiore qualità costruttiva e maggiori vantaggi economici circa i costi di trasporto e assemblaggio. Inoltre, una costruzione più rapida implicherebbe oneri finanziari minori ed un conseguente maggior interesse degli investitori in questa fonte.

Effettuando considerazioni sul fattore di capacità medio e la capacità media installata futura è possibile valutare il numero di reattori che occorrerebbe installare per ciascun scenario analizzato. Utilizzando i dati ottenuti nel **paragrafo 7.5.1**, è possibile valutare il numero di small modular reactor installati per ciascun scenario come segue:

$$n_r = \frac{C_{nuc}}{C_{sr}} \quad [n^\circ] \quad (7.4)$$

In cui:

- C_{nuc} è la capacità nucleare installata equivalente di ciascun scenario [W]
- C_{sr} è la capacità media degli small modular reactors, assunta pari a 300MW [W]

Le precedenti considerazioni portano ad ottenere, negli scenari a *basso, medio ed elevato potenziale tecnologico*, un aumento repentino del numero di reattori costruiti nel periodo 2020-2050, rispettivamente pari circa a 4727, 3210 e 2943; mentre nello scenario *irruzione tecnologica* si verifica un aumento meno considerevole pari a 393 nuovi reattori installati.

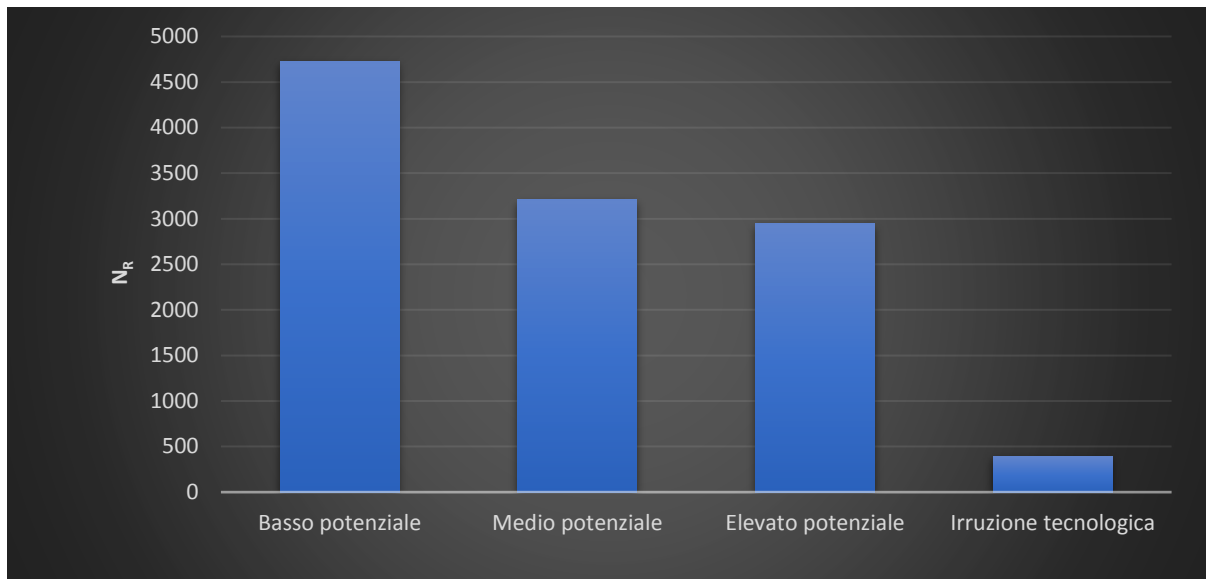


Figura 74: Numero di reattori installati per i differenti scenari. In figura si riporta il numero di reattori installati ottenuti attraverso l'utilizzo dei risultati del paragrafo 7.5.1 e della capacità media dei reattori small modular reactors.

Utilizzando un range di costi di investimento specifico pari a 2000- 5000 \$/kW, in linea con gli studi della World Nuclear Association [35] e l'**equazione (7.2)**, è possibile valutare i costi di investimento riportati nella seguente tabella.

Tabella 5: Investimenti nei nuovi impianti nucleari per i differenti scenari di riferimento. Gli investimenti, riportati in G\$, sono riferiti a differenti range di costi di investimenti specifici. Le capacità aggiuntive sono state ottenute nel paragrafo 7.5.1 ed i costi di investimenti sono stati calcolati basandosi sull'equazione (7.2).

| Scenario di riferimento | Costo di investimento specifico[\$/kW] | Capacità aggiuntiva ($C_{nuc,max} - C_{nuc,att}$) [GW] | Costo di Investimento [G\$] |
|------------------------------|--|--|-----------------------------|
| Basso potenziale | 2000-5000 | 1419 | 2838-7095 |
| Medio potenziale | 2000-5000 | 965 | 1930-4825 |
| Elevato potenziale | 2000-5000 | 882 | 1764-4410 |
| Irruzione tecnologica | 2000-5000 | 117 | 234-585 |

La produzione di un numero maggiore di reattori dal design semplificato comporterebbe una maggiore dimestichezza nella fase di realizzazione e consegna del progetto. Questa riduzione dei costi associata ad un maggiore *know-how* viene quantificata attraverso l'utilizzo di costi di investimento specifici minori rispetto al caso analizzato nel **paragrafo 7.5.2**. Sebbene questi risultati siano promettenti, occorre specificare che si tratta di una tecnologia non del tutto matura.

Il ruolo di ogni governo è ricreare un ambiente regolato e perdurabile, in cui le fonti a basso emissioni ottengano la corretta visibilità ed interesse da parte degli investitori. Occorre, per questa ragione, internalizzare i costi emissivi dei generatori fossili attraverso carbon tax ed emission trading system, al fine di garantire un'effettiva competitività delle fonti carbon-free.

Le tasse sulle emissioni di anidride carbonica aumenteranno i costi marginali associati a ciascuna fonte nel mercato elettrico. In particolare, si verificheranno sia un aumento del costo dell'elettricità

per i consumatori che maggiori guadagni per l'industria nucleare. Il costo effettivo di queste tasse deve essere soggetto ad un aumento graduale al fine di evitare impatti negativi sull'economia. La World Bank riporta che le tasse attualmente implementate sono minori di 20\$/t [46].

Queste considerazioni permettono di capire che l'effetto indiretto delle carbon taxes non sarà sufficiente a garantire gli investimenti in nuovi impianti nucleari, i quali sono caratterizzati attualmente da periodi costruttivi di circa dieci anni. L'adozione, invece, di benefici diretti ed incentivi all'industria nucleare attuale e futura possono garantire una maggiore sicurezza operativa e un ricorso maggiore a questa opzione.

Infine, per garantire una maggiore competitività dell'opzione nucleare rispetto all'utilizzo delle fonti rinnovabili, è necessario quantificare nel costo livellato dell'energia anche i relativi costi di sistema, costituiti da costi di profilo, bilancio, rete e connessione.

I costi di profilo sono riferiti all'aumento dei costi di generazione correlati alla variabilità dell'output delle rinnovabili. Sostanzialmente, essi riflettono le difficoltà economiche nella compensazione della domanda residua in un sistema con un'elevata penetrazione delle rinnovabili. La generazione rinnovabile, quali da fonte eolica e solare, è spesso caratterizzata da picchi produttivi in fasce orare specifiche della giornata che comporta un utilizzo parziale delle altre fonti ed un aumento dei costi operativi dovuti ad una minore efficienza di produzione.

I costi di bilancio sono riferiti all'aumento di flessibilità necessaria a garantire una maggiore sicurezza di dispacciamento dell'energia elettrica in caso di blackout non previsti ed errori nella previsione di produzione di potenza. Nella rete attuale, i costi delle riserve sono generalmente riferiti alle contingenze relative all'utilizzo e alla connessione dell'impianto di produzione di potenza maggiore. A causa della maggiore modularità e della imprevedibilità di produzione delle rinnovabili, occorre implementare un quantitativo di riserve di sicurezza maggiori che implicano, quindi, costi di bilancio più elevati.

I costi della rete riflettono l'aumento dei costi di trasmissione e distribuzione a causa della localizzazione distribuita dei generatori rinnovabili. Essi includono i costi di costruzione di nuove infrastrutture ed i costi di rafforzamento e riqualifica delle infrastrutture attuali.

I costi di connessione consistono nei costi di allacciamento di un impianto di produzione di potenza alla rete di trasmissione più vicina. Essi possono essere significativi se la fonte di produzione è lontana dalla prima unità di trasmissione, come nel caso dei parchi eolici off-shore, oppure se si tratta di risorse con un fattore di carico basso, caratteristica comune a tutte le fonti rinnovabili.

L'inclusione dei costi di sistema nel costo di generazione degli impianti convenzionali implicherebbe un aumento del LCOE pari a 1-3\$/MWh. Considerando, invece, degli scenari in cui la penetrazione delle rinnovabili varia tra il 10% ed il 75%, si ottengono costi di sistema rispettivamente pari a 8 \$/MWh e 50\$/MWh [47].

8-CONCLUSIONI E COMMENTI

Il mondo dell'energia evolve in maniera continua sospinto dai driver demografici, economici e politici. Le recenti crisi geopolitiche in Venezuela, Cile ed in Europa orientale, nonché la rivoluzione di produzione di scisto in America e delle rinnovabili mostrano quanto sia difficoltoso effettuare delle previsioni energetiche sia a breve che a lungo termine. L'utilizzo di modelli energetici implica un dispendio di energia considerevole per mantenere quanto più aggiornati i database di input al fine di ottenere risultati quanto più realistici e in scala con i dati attuali.

L'analisi dei parametri energetici più rilevanti, quali l'approvvigionamento di energia primaria, la produzione, il consumo finale e la generazione elettrica, mostrano una forte dipendenza dall'utilizzo di combustibili fossili a livello globale. Nel 2017, i combustibili fossili hanno rappresentato l'81,3% dell'approvvigionamento di energia primaria, il 79,4% dei consumi finali totali, l'80,1% della produzione primaria ed il 65,8% della produzione di potenza globale.

Il sistema climatico è un sistema molto complesso che risponde attraverso feedback ciclici alle modifiche indotte dall'uomo nelle sue componenti. L'elevata inerzia termodinamica del sistema terrestre comporta uno sfasamento temporale degli impatti osservabili. Queste considerazioni permettono di intuire l'impellenza e la profonda necessità di effettuare delle trasformazioni radicali che coinvolgano tutte le risorse basso emissive disponibili, compresa l'opzione nucleare.

Negli ultimi anni, questa fonte è stata aspramente criticata dall'opinione pubblica e differenti nazioni hanno espresso la volontà di effettuare un'eliminazione graduale di questa fonte dal proprio parco elettrico. I risultati ottenuti in questo studio scientifico valorano ed evidenziano quale possa essere il contributo del nucleare in questo processo di mitigazione in funzione di differenti potenziali tecnologici delle rinnovabili.

In particolar modo, si verifica un aumento significativo della capacità nucleare installata nel periodo 2020-2050 con dei massimi rispettivamente pari a 1821, 1367, 1284 e 519 GW, rispettivamente per gli scenari a *basso, medio, elevato potenziale ed irruzione tecnologica*. Occorre rimarcare che quest'ultimo scenario non pone limitazione tecnologiche effettive alle fonti rinnovabili. Si assume, in maniera molto ambiziosa, che le problematiche correlate alla modularità, all'accumulo, al controllo e alla stabilità della rete vengano completamente risolte nei prossimi trent'anni.

Inoltre, effettuando una valutazione economica basata sui coefficienti di costo più recenti, sono stati calcolati circa 3661-10220 G\$, 2490- 6949 G\$, 2276-6352 G\$ e 302-843 G\$ di investimenti necessari per la costruzione dei nuovi impianti nucleari negli scenari a *basso, medio, elevato potenziale e irruzione tecnologica*. È necessario aggiungere che occorre implementare la vita media di differenti impianti esistenti, al fine di garantire la continuità della produzione nucleare della flotta attuale. Gli investimenti addizionali per effettuare questo processo variano tra 190-380 G\$.

Gli aspetti economici del nucleare sono strettamente correlati all'intensità del capitale iniziale e al tasso di interesse applicato nella valutazione degli oneri finanziari. La costruzione di reattori modulari e l'internalizzazione dei costi emissivi e di sistema potrebbero ridurre i costi costruttivi e di generazione, riponendo una rinnovata fiducia negli investitori.

In conclusione, è possibile affermare che l'alternativa nucleare, fatta eccezione per un'eventuale irruzione tecnologica delle rinnovabili, sia indispensabile nella decarbonizzazione del sistema elettrico. Occorre, però, risolvere differenti sfide intrinseche all'utilizzo di questa fonte, quali l'ottimizzazione dell'implementazione della vita media, l'efficienza dell'industria stessa, la riduzione dei costi di investimento e l'aumento del livello di sicurezza.

Bibliografia

- [1] D. L. F. M. B. B. e. a. Lüthi, «High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000–800,000 years before present,» *Nature*, vol. 453, p. 379–382, 2008.
- [2] Intergovernmental Panel on Climate Change, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment,» 2018.
- [3] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, «Report of the Plenary of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on the work of its seventh session,» Paris, 2019.
- [4] NASA, «Global Climate Change: Vital signs of the planet,» [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/>.
- [5] Global Carbon Project, «Global Carbon Report,» 2019.
- [6] International Energy Agency, *World Energy Balances: Overview*, Parigi, 2019.
- [7] International Energy Agency, «World Energy Outlook 2017,» Parigi, 2017.
- [8] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2018*, Parigi, 2018.
- [9] C. K. Chyong, «European Natural Gas Markets: Taking Stock and Looking Forward,» *Review of Industrial Organization*, vol. 55, n. 3, pp. 89-109, 2019.
- [10] International Energy Agency, *Key World Energy Statistics*, Parigi, 2019.
- [11] International Energy Agency, *Renewables informations: Overview*, Parigi, 2019.
- [12] International Energy Agency, *Energy Efficiency*, Parigi, 2019.
- [13] British Petroleum, «BP Statistical Review of World Energy,» British Petroleum, 2019.
- [14] P. V. H. John M. Wallace, «Atmospheric Science: An Introductory Survey,» Elsevier, 2006.
- [15] Intergovernmental panel on climate change, «Fourth Assessment Report:Climate Change,» 2007.
- [16] R. G. B. a. B. E. G. Ian Allison, «CLIMATE AND CRYOSPHERE (CLIC) PROJECT,» 2001.
- [17] P. B. W. L. M. L. a. V. Z. Goosse H., «Introduction to climate dynamics and climate modeling,» 2008-2010.
- [18] I. M. H. a. B. J. Soden, «Water Vapor Feedback and Global Warming,» *Annual Review of Energy and the Environment*, vol. 25, pp. 441-475, 2000.
- [19] S. G. P. a. V. J. Inglezakis, *Environment and Development: Basic Principles, Human Activities, and Environmental Implications*, Elsevier, 2016.
- [20] L. J. T. e. al, «Lakes and reservoirs as regulators of carbon cycling and climate,» Association for the Sciences of Limnology and Oceanography, Inc., 2009.

- [21] N. N. C. f. E. Information, « 2019 Annual Climate Report,» 2019.
- [22] C. R, «Soil microorganisms as controllers of atmospheric trace gases (H₂, CO, CH₄, OCS, N₂O, and NO).,» *Microbiol Rev.*, vol. 4, n. 60, pp. 609-40, 1996.
- [23] K. e. al, «Reconstructed changes in Arctic sea ice over the past 1,450 years,» *Nature*, vol. 479, n. 7374, pp. 509-12, 2011.
- [24] N. G. P. T. F. S. & A. J. W. Peter U. Clark, «The role of the thermohaline circulation in,» *Nature*, vol. 415, pp. 863-869, 2002.
- [25] n. H. Bärbel Hönlisch, «Surface ocean pH response to variations in pCO₂ through two full glacial cycles,» *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 236, pp. 305-314, 2005.
- [26] I. P. o. C. Change, «Special Report on Global Warming of 1.5 °C,» 2018.
- [27] R. S. Ed Hawkins, «The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions,» *Bulletin of the American Meteorological Society*, vol. 90, n. 8, pp. 1095-1107, 2009.
- [28] W. N. Association, «World Nuclear Report 2019,» 2019.
- [29] N. E. Agency, «Uranium 2018: Resources, Production and Demand,» 2018.
- [30] N. E. Agency, «Nuclear technologies and development 2019,» 2019.
- [31] International Energy Agency, «Nuclear Power in a Clean Energy System,» 2019.
- [32] I. N. S. A. Group, Defence in Depth in Nuclear Safety INSAG-10, Vienna, 1996.
- [33] W. N. Association, October 2018. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/storage-and-disposal-of-radioactive-wastes.aspx>.
- [34] U. o. Chicago, «The economic future of nuclear power,» 2004.
- [35] W. N. Association, «Nuclear Power Economics and Project Structuring 2017 Edition,» 2017.
- [36] N. E. A. International Energy Agency, «Projected cost of generating electricity: 2015 edition,» 2015.
- [37] I. M. Fund, «World Economic Outlook 2017,» 2017.
- [38] G. G. a. D. C.-F. o. E. a. Business, «Penn World Table 9.0.»
- [39] G. B. Rob A. Wilson, «The impact of human capital on economic growth: a review,» Third report on vocational training research in Europe: background report.
- [40] U. Nations, «World Population Prospects,» 2017.
- [41] B. Petroleum, «Short Energy Outlook 2030,» 2013.
- [42] I. E. Agency, «World Energy Outlook 2013,» 2013.

[43] I. P. o. C. Change, «Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation,» 2011.

[44] I. M. Fund, «Fiscal Monitor Reports,» 2019.

[45] M. L. X. L.-O. X. Labandeira, «A meta-analysis on the price elasticity of energy demand,» *Energy Policy*, vol. 102, n. 3, pp. 549-568, 2017.

[46] T. W. Bank, «State and Trends of Carbon Pricing,» 2015.

[47] O. & NEA, «The Costs of Decarbonization: System costs with High Shares of Nuclear and Renewables,» 2019.