



**Politecnico
di Torino**

Politecnico di Torino

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Gestionale

A.a. 2023/2024

Sessione di Laurea Marzo/Aprile 2024

Crisi energetiche, neutralità climatica e nucleare

Relatore:

Prof. Carlo Rafele

Candidato:

Nicola Fiore

Matr.209321

Correlatore:

Prof. Federico Piglione

A mio nonno,
nonostante il ritardo.

ABSTRACT

Nel corso dell'ultimo secolo, il mondo ha affrontato diverse crisi energetiche che hanno scosso l'equilibrio e la sostenibilità dei sistemi globali di approvvigionamento energetico. Dallo shock petrolifero degli anni Settanta alle conseguenze della pandemia di COVID-19 e all'invasione russa dell'Ucraina, le dinamiche energetiche hanno subito profonde trasformazioni influenzando la stabilità economica, geopolitica e ambientale.

Il presente lavoro si propone di esaminare in dettaglio tali cambiamenti, focalizzandosi sui seguenti aspetti chiave: le crisi energetiche degli anni Settanta, gli impatti del COVID-19 sull'energia e le conseguenze dell'invasione russa dell'Ucraina. Attraverso un'analisi approfondita di tali eventi, si cercherà di comprendere quali sono state le reazioni a tutte le crisi, identificando le strategie adottate per affrontare gli shock energetici.

Il secondo capitolo esplorerà l'evoluzione dei consumi energetici mondiali, analizzando le fonti impiegate per soddisfare il fabbisogno energetico globale. Si approfondirà inoltre il contesto Europeo, esaminandone i consumi e le fonti utilizzate. Attraverso quest'analisi, si vuole fornire una visione chiara della struttura attuale del panorama energetico globale ed europeo.

Il terzo capitolo si concentrerà sul fenomeno dell'effetto serra e il suo impatto sulla temperatura globale. Attraverso una disamina dettagliata dell'atmosfera, della sua composizione e dei gas serra, si esplorerà il fenomeno del riscaldamento globale e le sue implicazioni per il nostro pianeta.

Successivamente, nel quarto capitolo, si pone il focus sulle emissioni di gas serra a livello mondiale, identificando i settori che contribuiscono maggiormente all'inquinamento atmosferico, ovvero gli utilizzatori delle fonti energetiche analizzate nel secondo capitolo. Particolare attenzione sarà dedicata alla produzione di energia elettrica, con un confronto tra

la produzione mondiale ed europea per fonte di energia, alla quale sono dovute circa i tre quarti delle emissioni totali.

Il quinto capitolo si concentrerà sul Green Deal Europeo, esaminando la sua natura, gli obiettivi da perseguire e le azioni previste dalla legge sul clima. Un'analisi approfondita dei finanziamenti, inclusi quelli previsti dal piano di investimenti per un'Europa sostenibile, NextGenerationEU e il Piano Nazionale per la Ripresa e la Resilienza, sarà fondamentale per comprendere come l'Unione Europea intende affrontare la sfida della transizione energetica e con quali mezzi.

Il sesto capitolo si addenterà nella prospettiva della neutralità carbonica al 2050, esaminando gli scenari climatici ipotizzati e approfondendo la roadmap per le zero emissioni nel settore energetico (NZE) disegnata dalla International Energy Agency. Attraverso l'analisi degli obiettivi prefissati, con gli strumenti e gli investimenti necessari, si valuteranno le strategie che con buone probabilità permetteranno di raggiungere la neutralità carbonica entro il 2050.

Il settimo e ultimo capitolo affronterà il ruolo del nucleare nella transizione energetica. Esaminando la storia, lo sviluppo e le potenzialità del nucleare civile si valuteranno i vantaggi e gli svantaggi di questa fonte energetica, analizzando criticamente il suo contributo alla riduzione delle emissioni e alla sicurezza energetica.

La presente tesi di laurea vuole fornire una panoramica completa circa le sfide energetiche globali, gli sforzi per la transizione verso fonti sostenibili e il ruolo del nucleare in questo contesto. La ricerca mira a contribuire alla comprensione critica di come l'umanità possa gestire la sua dipendenza dall'energia in modo sostenibile e responsabile.

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Consumi mondiali vettori energetici primari	13
Figura 2: Consumo mondiale di energia primaria per fonte puntuale	15
Figura 3: Consumo mondiale di energia primaria per fonte percentuale	15
Figura 4: Percentuale consumo mondiale macro categorie	17
Figura 5: Consumo mondiale puntuale macro categorie	18
Figura 6: Variazioni fonti energetiche utilizzate per fabbisogno mondiale.....	18
Figura 7: Crescita consumi energetici nel mondo e nelle diverse economie.....	19
Figura 8: Consumi europei vettori energetici primari	20
Figura 9: Consumo europeo di energia primaria per fonte puntuale	21
Figura 10: Consumo europeo di energia primaria per fonte percentuale	21
Figura 11: Consumo puntuale di energia primaria per fonte nell'Unione Europea.....	23
Figura 12: Consumo puntuale di energia primaria per fonte nell'Unione Europea.....	23
Figura 13: Variazioni fonti energetiche utilizzate per fabbisogno mondiale.....	24
Figura 14: Composizione dei gas serra.....	28
Figura 15: GWP dei vari gas.....	30
Figura 16 effetti indiretti dei gas effetto serra. Fonte: IPCC 2001	31
Figura 17: Le emissioni di gas serra nel mondo, 2021	35
Figura 18: Andamento delle emissioni di gas serra.....	36
Figura 19: Emissioni gas serra per Paese.....	37
Figura 20: Emissioni gas serra mondiali per settore produttivo	38
Figura 21: Emissioni gas serra in Europa per settore	39
Figura 22: Produzione mondiale di energia elettrica per fonte (TWh).....	41
Figura 23: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (%)	41
Figura 24: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (TWh).....	43
Figura 25: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (%)	43
Figura 26: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte	44
Figura 27: Produzione mondiale lorda di energia elettrica (TWh).....	45

Figura 28: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (TWh)	46
Figura 29: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (%).....	46
Figura 30: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (TWh)	48
Figura 31: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (%).....	49
Figura 32: Produzione di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (variazioni annuali)	50
Figura 33: Produzione lorda di energia elettrica nell'Unione Europea (TWh).....	51
Figura 34 Il Green Deal europeo.....	54
Figura 35: Piano per l'Europa sostenibile.....	56
Figura 36: Le fonti di finanziamento che permetteranno di raggiungere, nel prossimo decennio 7, almeno il livello di 1 000 miliardi di EUR nel quadro del piano di investimenti per un'Europa sostenibile.....	60
Figura 37: Diversificazione approvvigionamento energetico UE	65
Figura 38: Riempimento stoccaggi gas Paesi UE	66
Figura 39: Andamento prezzo del gas nell'UE.....	67
Figura 40: Crescita media PIL per Regioni	73
- Figura 41: Prezzi dei combustibili fossili per scenario	74
Figura 42: Prezzo medio importazioni di petrolio per scenario.....	75
Figura 43: Previsione dei prezzi dei minerali critici e dei metalli	75
Figura 44: Obiettivi per il raggiungimento della NZE	77
Figura 45: Evoluzione capacità installata totale e produzione di energia elettrica per fonte	81
Figura 46: Emissioni globali del settore elettrico e intensità di CO ₂ per produzione di energia elettrica.....	82
Figura 47: Cambiamenti nell'approvvigionamento energetico totale per fonte nello scenario Net Zero, 2022–2050.....	83
Figura 48: Tappe fondamentali per il settore elettrico nello scenario NZE.....	84
Figura 49: Livello di preparazione tecnologica per le tecnologie selezionate rispetto agli obiettivi di maturità tecnologica nello scenario NZE.....	86
Figura 50: Emissioni lorde, assorbite ed emissioni nette nelle economie avanzate nello scenario Net Zero, 2010-2050	91

Figura 51: Emissioni lorde, assorbiti ed emissioni nette nelle economie emergenti e in via di sviluppo nello scenario Net Zero, 2010-2050	91
Figura 52: Potenza nucleare in servizio nelle varie regioni in GW (a sinistra) e produzione di elettricità in TWh (a destra) dal 1954 al 2021	96
Figura 53: Produzione netta di energia elettrica e numero di reattori per Paese	97
Figura 54: Evoluzione dei reattori a fissione	99
Figura 55: Capacità dell'energia nucleare e aumenti di capacità medi annuali nello scenario NZE, 1990-2050.....	101
Figura 56: Emissioni dirette e indirette di gas serra provenienti da vari sistemi di generazione di energia	104
Figura 57: Supposizione costi di costruzione dell'energia nucleare per Paesi selezionati nello scenario NZE entro il 2050 (prezzi del 2020 in USD/kW)	110
Figura 58: LCOE diverse tecnologie per Paese nello scenario NZE	111
Figura 59: Costi previsti per la generazione di elettricità 2020	112
Figura 60: Valore marginale dell'energia a basse emissioni per fonte al variare delle quote totali di produzione.....	113
Figura 61: Tempo di realizzazione degli impianti nucleari costruiti dal 1967 al 2021 per Paese	114
Figura 62: Costi overnight e tempi di costruzione relativi a progetti nucleari recenti .	115
Figura 63: Ripartizione dei costi per il costo livellato dell'energia nucleare.....	117
Figura 64: Benchmark costo di generazione di una centrale nucleare e un impianto CCGT	118
Figura 65: Intervallo LCOE per fonti elettriche dispacciabili a basse emissioni nello Scenario di Sviluppo Sostenibile, 2030, 2040 e 2050	119
Figura 66: Disponibilità dell'uranio per Paese.....	123
Figura 67: Benchmark evoluzione mensile prezzo del gas naturale e dell'uranio (gen 1992 – lug 2022).....	124
Figura 68: I reattori nucleari termici di quarta generazione VHTR	127
Figura 69: I reattori nucleari termici di quarta generazione SCWR.....	128
Figura 70: I reattori nucleari a neutroni veloci di quarta generazione LFR	129

INDICE

ABSTRACT	IV
INDICE DELLE FIGURE	VI
INDICE.....	IX
INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1 LE CRISI ENERGETICHE DELL’ULTIMO SECOLO	3
1.1 Le crisi degli anni Settanta.....	4
1.1.1 Prima crisi energetica del 1973:.....	4
1.1.2 Seconda crisi energetica del 1979:.....	5
1.2 Gli effetti del COVID-19 sull’energia.....	6
1.3 L’invasione Russa dell’Ucraina.....	7
1.4 Reazioni comuni a tutte le crisi.....	9
CAPITOLO 2 L’ENERGIA	11
2.1 L’evoluzione dei consumi energetici mondiali.....	12
2.2 Analisi delle fonti impiegate per il fabbisogno energetico mondiale	14
2.3 L’evoluzione energetica dell’Unione Europea	19
2.4 Analisi delle fonti impiegate per il fabbisogno energetico europeo	20
CAPITOLO 3 L’EFFETTO SERRA: IMPATTO SULLA TEMPERATURA	25
3.1 Cos’è l’effetto serra	25
3.2 L’atmosfera e la sua composizione.....	26
3.3 I gas serra (<i>Greenhouse Gases</i> – GHG).....	27
3.4 Il riscaldamento globale.....	29
3.5 Le evidenze e gli impatti del cambiamento climatico	32
CAPITOLO 4 LE EMISSIONI DEI GHG	35
4.1 Analisi delle emissioni mondiali di GHG.....	36
4.2 Quale settore inquina di più?	38
4.3 La produzione di energia elettrica	40

4.3.1	La produzione mondiale di energia elettrica per fonte.....	41
4.3.2	La produzione europea di energia elettrica per fonte.....	45
CAPITOLO 5	IL GREEN DEAL EUROPEO	52
5.1	Cos'è il Green Deal Europeo	52
5.2	Il piano dell'UE per salvare la Terra	54
5.3	Le azioni previste dalla legge sul clima.....	56
5.4	Gli obiettivi da perseguire.....	57
5.5	Il motore della transizione: i finanziamenti	58
5.5.1	Il piano di investimenti per un'Europa sostenibile	59
5.5.2	NextGenerationEU e Piano Nazionale per la Ripresa e la Resilienza	62
5.5.3	il piano REPowerEU	64
CAPITOLO 6	NEUTRALITÀ CARBONICA 2050.....	69
6.1	Introduzione	69
6.2	Gli scenari climatici e le ipotesi.....	70
6.3	Gli scenari IEA	70
6.3.1	Le ipotesi alla base dei modelli.....	72
6.4	La roadmap per le zero emissioni del settore energetico: Lo scenario NZE ...	76
6.4.1	Gli obiettivi raggiungibili con gli strumenti già disponibili	78
6.4.2	L'importanza dell'elettrificazione e della riduzione dei consumi dei combustibili fossili	79
6.4.3	La generazione di elettricità.....	80
6.4.3.1	L'approvvigionamento energetico totale.....	82
6.4.3.2	Le pietre miliari dello scenario NZE.....	84
6.4.4	L'impatto dell'innovazione nel modello.....	86
6.4.5	Le infrastrutture.....	86
6.4.6	Gli investimenti necessari	88
6.4.7	I rischi legati alla transizione sicura.....	88
6.4.8	L'importanza della cooperazione internazionale	90
CAPITOLO 7	IL RUOLO DEL NUCLEARE NELLA TRANSIZIONE	93
7.1	La storia del nucleare	93
7.2	Lo sviluppo del nucleare civile	94
7.3	Le centrali nucleotermoelettriche e i combustibili nucleari.....	97
7.4	L'energia nucleare e il Net Zero Emissions.....	100
7.4.1	L'utilizzo dell'elettricità dal nucleare per produrre idrogeno e calore ..	102

7.4.2 NZE senza il nucleare	102
7.5 I vantaggi del nucleare oggi.....	103
7.5.1 Le emissioni dirette e indirette.....	103
7.5.2 La sicurezza energetica	105
7.5.3 La ridotta occupazione del suolo.....	106
7.5.4 Le relazioni estere	106
7.5.4.1 I guadagni finanziari nelle esportazioni	107
7.5.4.2 L'influenza politica	107
7.5.4.3 Il prestigio.....	109
7.6 Gli svantaggi del nucleare oggi	109
7.6.1 I costi della tecnologia	109
7.6.1.1 I tempi di costruzione	113
7.6.1.2 Il costo del capitale.....	116
7.6.2 I rischi legati alla produzione.....	119
7.6.2.1 La gestione dei rifiuti nucleari.....	120
7.6.2.2 Gli incidenti nucleari	120
7.6.3 La scarsa accettazione sociale.....	121
7.6.4 L'apporto energetico reale dell'uranio.....	122
7.6.5 Il mercato dell'uranio.....	123
7.6.6 Le risorse limitate.....	124
7.7 Il futuro del nucleare.....	125
7.7.1 I reattori di quarta generazione	126
7.7.1.1 I reattori termici.....	127
7.7.1.2 I reattori a neutroni veloci	129
7.7.2 Gli Small Modular Reactors - SMR.....	130
7.7.3 Gli Advanced Modular Reactor – AMR.....	131
7.7.4 I reattori a fusione nucleare.....	132
7.7.5 I diversi ambiti di applicazione del nucleare.....	133
CONCLUSIONE	135
BIBLIOGRAFIA.....	138
Fonti.....	138
RINGRAZIAMENTI	149

INTRODUZIONE

Nel corso dell'ultimo secolo, l'umanità ha assistito a un profondo cambiamento nel suo approccio all'approvvigionamento energetico, con una crescente dipendenza da fonti fossili quali carbone, petrolio e gas naturale. Questo modello energetico ha indiscutibilmente contribuito allo sviluppo industriale e tecnologico, ma ha anche generato gravi conseguenze ambientali, caratterizzate da un aumento delle emissioni di gas serra, deterioramento della qualità dell'aria e impatti negativi sul cambiamento climatico. La storia dell'uomo dimostra quanto l'approvvigionamento sicuro e a basso costo di energia rappresenti un importante tassello per lo sviluppo sostenibile, la crescita e il benessere di una società moderna. D'altro canto, a causa dei crescenti fabbisogni energetici a livello globale e dell'esigenza di contrastare le problematiche connesse al cambiamento climatico, lo scenario energetico mondiale sta subendo una graduale trasformazione guidata da una complessa transizione energetica, nella quale il settore elettrico gioca un ruolo fondamentale.

La transizione porta con sé l'importante sfida di garantire un adeguato e costante approvvigionamento di energia elettrica, la cui domanda è in forte crescita soprattutto negli ultimi anni, favorendo contestualmente la riduzione delle emissioni di gas a effetto serra ed in particolare della CO_2 . Il raggiungimento di un'economia "sostenibile" rende inevitabile la decarbonizzazione dei sistemi energetici, da sempre dominati dai combustibili fossili, quindi caratterizzati da un'alta impronta di carbonio e, di conseguenza, molto impattanti sull'ambiente e pericolosi per la salute dell'uomo.

L'irreversibilità dei cambiamenti climatici è una preoccupazione centrale, poiché alcuni impatti potrebbero perdurare per lunghi periodi, nonostante l'intensificazione delle azioni di mitigazione. Aumento del livello del mare, perdita di biodiversità, cambiamenti negli oceani e modifiche nei pattern climatici, con conseguente espansione della desertificazione, sono solo alcune delle conseguenze per cui è doveroso intervenire tempestivamente con il massimo sforzo.

In questo contesto globale, il panorama energetico mondiale emerge come un intricato tessuto di varie fonti e dinamiche, con le economie industrializzate che si sforzano di

bilanciare la crescita economica con la sostenibilità energetica mentre le realtà emergenti persistono nell'utilizzo delle fonti tradizionali. Le consuetudini energetiche mondiali riflettono le differenze socio-economiche che lo caratterizzano, enfatizzando la sfida per garantire un accesso universale all'energia pulita.

I rischi legati all'approvvigionamento energetico, quali instabilità geopolitiche e fluttuazioni dei prezzi delle materie prime, richiedono una riflessione approfondita sulle fonti energetiche e sulle politiche di sicurezza. La cooperazione internazionale diventa cruciale nell'affrontare le sfide delle emissioni, considerando le interconnessioni globali e gli impatti condivisi. Mentre alcuni paesi possono resistere a misure condivise per preservare la propria crescita economica, l'urgenza di affrontare il cambiamento climatico richiede un approccio collettivo e sostenibile.

Attraverso questa ricerca, ci proponiamo di esplorare le dinamiche della transizione energetica nel contesto più ampio del panorama energetico mondiale, analizzando le sfide, le opportunità e la necessità di una cooperazione globale per garantire un futuro energetico sostenibile e prospero.

Capitolo 1

LE CRISI ENERGETICHE DELL'ULTIMO SECOLO

Dal 2020 ad oggi il settore energetico sta attraversando forti turbolenze dovute dapprima agli effetti della pandemia da COVID 19 e successivamente all'invasione russa dell'Ucraina, iniziata nel febbraio 2022. Le conseguenze sociali, politiche ed economiche hanno portato ad una vera e propria crisi energetica globale. I prezzi di tutte le fonti energetiche e dell'elettricità hanno raggiunto livelli record, causando elevati livelli di inflazione, ridotto il potere di acquisto delle famiglie e costringendo alcune fabbriche a ridurre o fermare la produzione.

Questo effetto domino ha rallentato la crescita economica e alcuni paesi si trovano prossimi a entrare in una grave recessione. L'Europa, particolarmente vulnerabile per la sua dipendenza storica dalla Russia per l'approvvigionamento di gas, risulta essere tra le economie più colpite dalla stretta dell'aumento dei prezzi dei combustibili e, di conseguenza, di tutta l'energia.

Il confronto con il passato ha riportato alla memoria lo shock petrolifero degli anni '70, che ha impattato la sola fornitura del petrolio ed economie molto meno interconnesse rispetto a quelle odierne. Per questo oggi parliamo di *prima vera crisi energetica globale*. [1]

In Europa, alcune industrie dipendenti dal gas hanno ridotto la produzione a causa dei prezzi troppo elevati, mentre in Cina alcune fabbriche hanno subito interruzioni nell'approvvigionamento di energia elettrica. Le economie emergenti e in via di sviluppo, dove la spesa energetica rappresenta una parte significativa del bilancio familiare, stanno vivendo un aumento della povertà e la difficoltà nel raggiungere l'accesso universale all'energia a prezzi accessibili. Anche nelle economie avanzate, l'aumento dei prezzi ha colpito famiglie vulnerabili, creando tensioni economiche, sociali e politiche.

Le politiche ambientali sono state accusate di contribuire all'aumento dei prezzi dell'energia, ma non vi sono prove a sostegno di tale responsabilità. In realtà, un maggior accesso a fonti

e tecnologie energetiche pulite avrebbe protetto i consumatori e ridotto parte della pressione sui prezzi dei combustibili. [2]

Di seguito saranno brevemente trattate le crisi energetiche che hanno maggiormente influito sulle economie mondiali dal secondo dopoguerra ad oggi.

1.1 Le crisi degli anni Settanta

Le crisi energetiche degli anni '70 furono due eventi fondamentali che hanno avuto un impatto significativo sull'economia globale, plasmandone il panorama energetico e politico.

1.1.1 Prima crisi energetica del 1973:

Negli anni '70, l'Occidente si trovò ad affrontare una grave crisi energetica, segnata dalla brusca impennata dei prezzi del petrolio tra l'autunno del 1973 e l'inverno 1974. Questo periodo di austerità e difficoltà colpì duramente le economie dell'Europa occidentale e degli Stati Uniti, portando a un aumento del costo del petrolio del 300 per cento in soli cinque mesi.

Lo shock petrolifero fu innescato da un evento geopolitico cruciale: l'attacco dell'esercito egiziano a Israele il 6 ottobre 1973, durante la festività ebraica dello Yom Kippur. In risposta a questo conflitto, i paesi dell'OPEC (Organizzazione dei Paesi Esportatori di Petrolio) decisero di aumentare drasticamente i prezzi del petrolio a livello globale e di ridurre le esportazioni del 25%, imponendo inoltre un embargo contro i paesi filoisraeliani.

Tuttavia, la causa principale di questa crisi energetica fu di natura monetaria. Nel 1971, l'amministrazione Nixon mise fine alla convertibilità del dollaro in oro, causando una svalutazione della valuta. I paesi produttori di petrolio, principalmente arabi, furono costretti ad aumentare i prezzi per compensare la perdita di valore del dollaro.

Le conseguenze di questa crisi furono avvertite in modo tangibile dagli europei, che furono costretti a ridurre drasticamente il consumo di energia e a lasciare le auto a casa. L'inflazione raggiunse livelli record in tutta la Comunità Europea, mentre i tassi di crescita economica crollarono. Nonostante le drastiche azioni intraprese dai governi per far fronte all'emergenza energetica, le conseguenze si tradussero in un nuovo fenomeno economico: la stagflazione, caratterizzata da inflazione elevata e bassa crescita economica.

Questa crisi ebbe un impatto duraturo sull'Europa occidentale, che cominciò a diversificare le fonti energetiche e a produrre auto a minor consumo. Nel tentativo di gestire la situazione,

l'Occidente scoprì nuove riserve di petrolio nel Mare del Nord, favorendo contestualmente l'ascesa dell'Unione Sovietica nelle esportazioni mondiali di petrolio. [3]

1.1.2 *Seconda crisi energetica del 1979:*

La crisi del petrolio del 1979 fu innescata da una serie di eventi, tra cui:

- la rivoluzione iraniana, con la conseguente caduta dello scià Mohammad Reza Pahlavi, portò ad una significativa riduzione delle forniture di petrolio dall'Iran, uno dei principali produttori mondiali.

- il conflitto tra Iraq ed Iran.

- le tensioni crescenti tra Stati Uniti e Unione Sovietica, causate dall'invasione sovietica dell'Afghanistan, contribuirono ad aumentare le turbolenze dei mercati energetici globali.

“La seconda crisi energetica” esacerbò la già precaria situazione economica globale. I prezzi del petrolio raggiunsero nuovi picchi, portando a un aumento dell'inflazione e a un'ulteriore contrazione dell'attività economica. I Paesi si trovarono di fronte a costi energetici elevati e una crescente incertezza riguardo all'approvvigionamento futuro di petrolio. Venne accentuata, quindi, l'urgenza di sviluppare strategie a lungo termine per ridurre la dipendenza dal petrolio straniero. A tal proposito molte nazioni intensificarono gli sforzi per promuovere politiche sostenibili volte all'efficienza energetica, alle energie rinnovabili e verso altre fonti alternative. [4]

In conclusione, le crisi energetiche degli anni '70 furono causate principalmente da eventi geopolitici e portarono a un aumento dei prezzi del petrolio, innescando una serie di impatti economici negativi a livello globale, ponendo la fine dei “trenta gloriosi” anni di grande crescita economica dopo la fine della seconda guerra mondiale.

Tuttavia, queste crisi funsero anche da catalizzatori per lo sviluppo di politiche energetiche più sostenibili e per l'adozione di fonti di energia alternative. Le lezioni apprese durante questo periodo hanno avuto un impatto duraturo sull'approccio globale alla gestione delle risorse energetiche e sull'importanza di diversificare le fonti di approvvigionamento e promuovere l'efficienza energetica. Per tali motivi furono denominate anche “crisi di transizione”. [4]

1.2 Gli effetti del COVID-19 sull'energia

La pandemia globale da COVID-19 ha scosso il mondo a partire dalla fine del 2019, portando a un'epidemia senza precedenti che ha avuto ripercussioni su tutti gli aspetti della nostra vita. Oltre agli impatti sulla salute, il COVID-19 ha innescato una crisi energetica globale che ha posto sfide significative all'industria energetica e all'economia mondiale. Quest'ultima è stata caratterizzata da una brusca diminuzione della domanda di energia a livello globale dovuta al lockdown, alle restrizioni imposte per contenere la diffusione del virus, alla mobilità umana drasticamente ridotta e ai fermi produttivi di molte industrie e attività commerciali. Questo improvviso crollo della domanda ha avuto un impatto senza precedenti sui mercati energetici, portando a una sovrapproduzione e a una significativa caduta dei prezzi dei combustibili fossili.

Uno dei settori più colpiti dalla crisi energetica è stato quello petrolifero. La drastica riduzione della domanda ha portato a un eccesso di capacità produttiva, spingendo i prezzi del petrolio ai minimi storici. Il crollo del prezzo del greggio è stato favorito anche dalla guerra dei prezzi intrapresa dall'Arabia Saudita e dalla Russia. Infatti, pur di guadagnare quote di mercato, entrambi i paesi esportatori, hanno generato un eccesso di offerta. [5]

La crisi energetica causata dal COVID-19 ha avuto gravi conseguenze sull'economia mondiale, specialmente per i paesi fortemente dipendenti dalle entrate petrolifere, con gravi conseguenze finanziarie, politiche e sociali. Tutti i settori sono stati "toccati" dalla crisi, ma a risentirne maggiormente sono state le filiere caratterizzate da processi molto energivori. Le difficoltà operative sono state contrastate dalle aziende mediante riduzioni del personale, sospensioni produttive ed, in alcuni casi, con chiusure definitive.

Nonostante le sfide incontrate, la crisi energetica causata dal COVID-19 ha anche offerto opportunità di riflessione e cambiamento. Ha spinto molti paesi a riconsiderare le proprie strategie energetiche, puntando a ridurre la dipendenza dai combustibili fossili e sulla promozione di fonti energetiche più sostenibili, come le energie rinnovabili. Il lockdown e la riduzione delle attività produttive, inoltre, hanno portato a una temporanea diminuzione delle emissioni di gas serra, evidenziando l'importanza di affrontare la crisi climatica e la necessità di una transizione verso un futuro energetico più verde e sostenibile.

In questo contesto la ricerca di soluzioni innovative e la promozione dell'efficienza energetica sono diventate priorità per molte nazioni. La crisi energetica ha posto l'accento sull'importanza di costruire un sistema energetico più resiliente, adattabile e in armonia con

l'ambiente. L'adozione di politiche mirate e l'investimento nelle tecnologie verdi rappresentano un passo fondamentale verso un futuro energetico sostenibile per le generazioni future. Le fragilità emerse del sistema energetico hanno rappresentato quindi “un’opportunità” per accelerare la transizione verso fonti energetiche più sostenibili.

1.3 L'invasione Russa dell'Ucraina

La crisi energetica globale legata all'invasione dell'Ucraina da parte della Russia ha scosso l'equilibrio dell'approvvigionamento e della sicurezza energetica internazionale, con implicazioni significative per i mercati energetici e la geopolitica globale, già fortemente turbata dai postumi della pandemia da Covid-19. L'invasione da parte della federazione Russa, iniziata nel 2014, con l'annessione della Crimea, ha raggiunto l'apice il 24 febbraio 2022 con la "missione di mantenimento della pace" nel Donbass ordinata da Putin [6]. I motivi che hanno spinto il Cremlino ad attuare l'aggressione suddetta, sono attribuibili principalmente a 2 motivi, il primo economico ed il secondo politico.

Per quanto riguarda l'aspetto economico, l'Ucraina rappresenta un importante corridoio per il transito del gas naturale russo verso l'Europa, oltre che una terra estremamente ricca di risorse minerarie, gas e petrolio¹. Questa posizione strategica la rende un attore chiave nella sicurezza energetica dell'Europa, ma allo stesso tempo fortifica l'influenza e l'importanza della Russia sul vecchio continente e, di conseguenza, sui mercati mondiali. La Russia, da sempre, ha cercato di mantenere il controllo sul flusso di gas verso l'Europa, utilizzando l'energia come una leva di potere per influenzare gli affari internazionali e garantirsi un vantaggio geopolitico.

Per quanto riguarda le possibili cause politiche, invece, vediamo che le relazioni tra i due Paesi, già molto tese a causa delle divergenze sull'orientamento politico che vedevano l'Ucraina più vicina al mondo occidentale che al mondo “sovietico”, hanno raggiunto l'apice con il desiderio della stessa di entrare nella Nato a seguito della prima invasione subita nel

¹ L'Ucraina vanta ricchi giacimenti di materie prime come carbone, minerale di ferro, gas, petrolio, argilla. L'industria pesante (siderurgia, metallurgia, chimica) attinge agli importanti giacimenti locali di minerali di ferro e ai depositi di carbone. Nell'anno 2012 è salita al 9 posto tra 62 paesi produttori d'acciaio ed è tra i primi dieci paesi produttori ed esportatori di metalli. All'Ucraina inoltre appartiene il record nella produzione del carbone all'interno dell'Europa, occupando il 13-simo posto nel mondo ed è il quarto paese in Europa per riserve di gas e petrolio. Vanta, inoltre, delle ingenti riserve di caolino, argille plastiche ed argille refrattarie, che costituivano circa il 70% delle riserve dell'ex Unione Sovietica. Nel territorio ucraino è presente l'unico deposito europeo di sabbie minerali, da cui si estrae zirconio per 35.000 tpa, il che fa dell'Ucraina il sesto produttore mondiale. L'Ucraina ha i più grandi giacimenti di uranio d'Europa. [67]

2014. Scelta non condivisa dalla Federazione Russa, che si vedeva minacciata dal probabile avanzamento delle basi militari ad est e dallo “stile di vita” occidentale. (L'Ucraina, storicamente legata alla Russia in quanto stato post-sovietico, continua a condividere con la sua vicina alcuni valori culturali, tra cui la religione ortodossa). Inoltre verrebbe meno l'accordo internazionale che definiva l'Ucraina ed altri Paesi come degli Stati “cuscinetto”, fondamentali per delimitare l'egemonia politica, economica e militare tra l'ex mondo sovietico e il liberalismo occidentale, a seguito della guerra fredda. [7]

L'Europa, notevolmente dipendente dalle importazioni energetiche russe, ha acconsentito alla Federazione Russa di esercitare una forte influenza politica e di utilizzare l'energia come arma economica nei confronti dell'Europa, della Nato, oltre che dell'Ucraina stessa, fino all'invasione del febbraio 2022, condannando unanimemente l'invasione armata dei confini di uno stato sovrano.

Le forniture di gas verso l'occidente sono state interrotte o ridotte, causando fluttuazioni dei prezzi e turbolenze nel commercio internazionale di energia. Si sono materializzati i timori riguardanti la sicurezza energetica dell'Europa, evidenziandone le sue vulnerabilità.

I Paesi europei hanno cercato di trovare alternative e di diversificare le fonti energetiche per ridurre la loro dipendenza dalle forniture russe.

La decisione di eliminare le importazioni energetiche da Mosca è solo uno degli sviluppi innescati dalla crisi. Il conflitto ha provocato una profonda revisione del concetto di mercato unico dell'energia promosso dalla Commissione Europea negli anni ottanta. In questo periodo, il paradigma del mercato includeva la liberalizzazione energetica, lo smantellamento dei monopoli nazionali e la transizione dai contratti a lungo termine alle negoziazioni spot nelle borse del gas. Tuttavia, con l'esplosione dei prezzi del gas a seguito della guerra, alcuni paesi dell'UE hanno richiesto un maggiore coinvolgimento statale nel settore energetico. Questo "ritorno dello stato" si è manifestato a livello comunitario attraverso proposte come il “*price cap*” per il gas e meccanismi di acquisto congiunto, incontrando però resistenze. A livello nazionale, diversi paesi, specialmente quelli dipendenti dall'approvvigionamento energetico russo, hanno adottato politiche più interventiste.

L'Italia, precedentemente uno dei principali partner energetici di Mosca insieme alla Germania, ha visto un ritorno dello stato incarnato da imprese pubbliche come ENI e SNAM. Alcuni paesi, come la Francia e la Germania, hanno nazionalizzato o salvato aziende

energetiche cruciali. Prima del 2022, l'Italia era fortemente dipendente dalle forniture estere. Basti pensare che veniva importato oltre il 95% della domanda di gas, di cui il 40% proveniente dalla Russia. La crisi ha spinto questi paesi a reagire rapidamente per evitare un peggioramento della crisi energetica, sostituendo le importazioni di gas russo e cercando soluzioni a livello nazionale e comunitario. [8]

La crisi ha avuto conseguenze molto negative anche per l'economia russa. Le sanzioni internazionali e l'isolamento economico ne hanno danneggiato il settore energetico, ridotto i profitti derivanti dalle esportazioni di gas, con conseguenze importanti per tutta l'economia.

1.4 Reazioni comuni a tutte le crisi

I governi, anche se in epoche diverse, intrapresero pressappoco le medesime azioni per far fronte alle emergenze causate dalle crisi energetiche. Queste azioni differivano di poco da paese a paese, ma si basavano su approcci comuni per mitigare gli effetti delle crisi e cercare soluzioni a lungo termine. Alcune delle principali azioni intraprese dai governi includono:

- *Rationing* o razionamento: per affrontare la scarsità di fonti energetiche e controllare la domanda, molti paesi hanno implementato sistemi di razionamento dei combustibili, riducendone i consumi.
- Promozione dell'efficienza energetica: i governi hanno promosso l'efficienza energetica in vari settori, compresi trasporti, industrie e edifici mediante incentivi fiscali, finanziamenti e programmi di sensibilizzazione per ridurre i consumi energetici.
- Sostegno alle energie rinnovabili: sono stati incentivati gli investimenti nelle energie rinnovabili, come l'energia solare, eolica e idroelettrica ed hanno incoraggiato, mediante appositi sussidi, lo sviluppo di fonti di energia alternative.
- Diversificazione delle fonti di approvvigionamento: Molte nazioni cercarono di diversificare le loro fonti di approvvigionamento energetico per ridurre la dipendenza estera. Ciò ha portato all'esplorazione e allo sviluppo di risorse interne, come il carbone, il gas naturale e l'energia nucleare.
- Investimenti in ricerca e sviluppo: sono aumentati i finanziamenti per la ricerca e lo sviluppo di tecnologie energetiche avanzate includendo tecnologie per l'efficienza energetica, le energie rinnovabili e altre fonti di energia sostenibile.

- Diplomazia energetica: sono aumentati gli sforzi diplomatici per garantire una maggiore stabilità nei mercati delle fonti energetiche e per negoziare accordi di approvvigionamento a lungo termine con paesi produttori “amici”.
- Promozione del trasporto pubblico e/o mobilità sostenibile: Per ridurre la domanda di vettori energetici nel settore dei trasporti, molti governi hanno investito nell'espansione e nel miglioramento del trasporto pubblico, incoraggiando i cittadini a utilizzare mezzi di trasporto condivisi e mezzi più sostenibili.
- Programmi di conservazione energetica: sono stati avviati programmi di sensibilizzazione per incoraggiare le persone a ridurre il consumo energetico nelle loro abitazioni e nei luoghi di lavoro.

Queste azioni e politiche hanno contribuito a ridurre l'impatto delle crisi energetiche passate e a promuovere una maggiore consapevolezza dell'importanza di una politica energetica sostenibile e “*resilient-orientata*” per il futuro. Per poter dare il giusto apporto e raggiungere gli obiettivi comuni è fondamentale che tutti i provvedimenti vengano presi in seria considerazione e messi in atto da tutte le parti coinvolte.

Capitolo 2

L'ENERGIA

“L'energia è stata ed è sempre più il fattore dominante per lo sviluppo sociale ed economico delle popolazioni: esiste un legame diretto tra energia e sviluppo e quello tra energia e ambiente che diventa sempre più stretto nella transizione ecologica/ambientale.”

[9]

Questa affermazione riflette l'importanza cruciale dell'energia in molteplici aspetti della vita moderna, rappresentando il motore chiave della crescita economica. I paesi con accesso a un'energia abbondante e conveniente tendono ad avere economie più forti. Questo perché sono favoriti i settori cruciali come il trasporto, le tecnologie dell'informazione, l'edilizia e molti altri.

L'energia è un pilastro fondamentale per l'industria e la produzione. Le aziende e le fabbriche richiedono energia per alimentare macchinari, processi di produzione e logistica. Senza un approvvigionamento energetico affidabile, la produzione industriale si ridurrebbe notevolmente con un impatto negativo sull'economia.

I trasporti, in particolare, dipendono pesantemente dall'energia. Veicoli, treni, aerei e navi richiedono energia per funzionare sostenendo la mobilità delle persone e delle merci, contribuendo all'integrazione e al progresso delle comunità e delle regioni.

L'accesso a un'energia affidabile e conveniente migliora sensibilmente lo standard di vita delle persone: è essenziale per il riscaldamento e il raffreddamento delle case, la cottura dei cibi, l'illuminazione e l'uso di dispositivi elettronici. Senza un adeguato approvvigionamento energetico, la vita quotidiana diventerebbe molto più difficile.

Settori cruciali come la sanità e l'istruzione dipendono altresì dall'energia. Gli ospedali, ad esempio, hanno bisogno di energia per alimentare attrezzature mediche e mantenere condizioni igieniche adeguate. Le scuole e le università contano sull'energia per l'illuminazione, la climatizzazione e l'uso di dispositivi elettronici per l'apprendimento.

Tuttavia, è importante sottolineare che il consumo eccessivo di fonti non rinnovabili per la produzione di energia, come i combustibili fossili, può comportare gravi impatti ambientali,

tra cui l'inquinamento atmosferico e le emissioni di gas serra. Pertanto, per garantire uno sviluppo sostenibile, il mondo sta gradualmente orientandosi verso fonti di energia più pulite e rinnovabili, come l'energia solare ed eolica.

Anche garantire un accesso universale all'energia è una sfida critica per migliorare la qualità della vita e stimolare lo sviluppo economico. Molte parti del mondo, soprattutto nelle zone rurali dei paesi in via di sviluppo, lottano per ottenere un accesso affidabile all'energia e affrontare questa sfida è essenziale per ridurre le disuguaglianze e promuovere uno sviluppo equo.

L'energia, quindi, svolge un ruolo centrale e irrinunciabile nello sviluppo sociale ed economico della popolazione globale. La gestione efficiente e sostenibile delle risorse energetiche è fondamentale per garantire uno sviluppo duraturo e migliorare la qualità della vita delle persone in tutto il mondo.

2.1 L'evoluzione dei consumi energetici mondiali

L'evoluzione dei consumi energetici mondiali dalla rivoluzione industriale ad oggi è un tema di grande rilevanza e complessità, con profondi impatti sulla società, sull'economia e sull'ambiente. Questo percorso storico può essere suddiviso in diverse fasi significative.

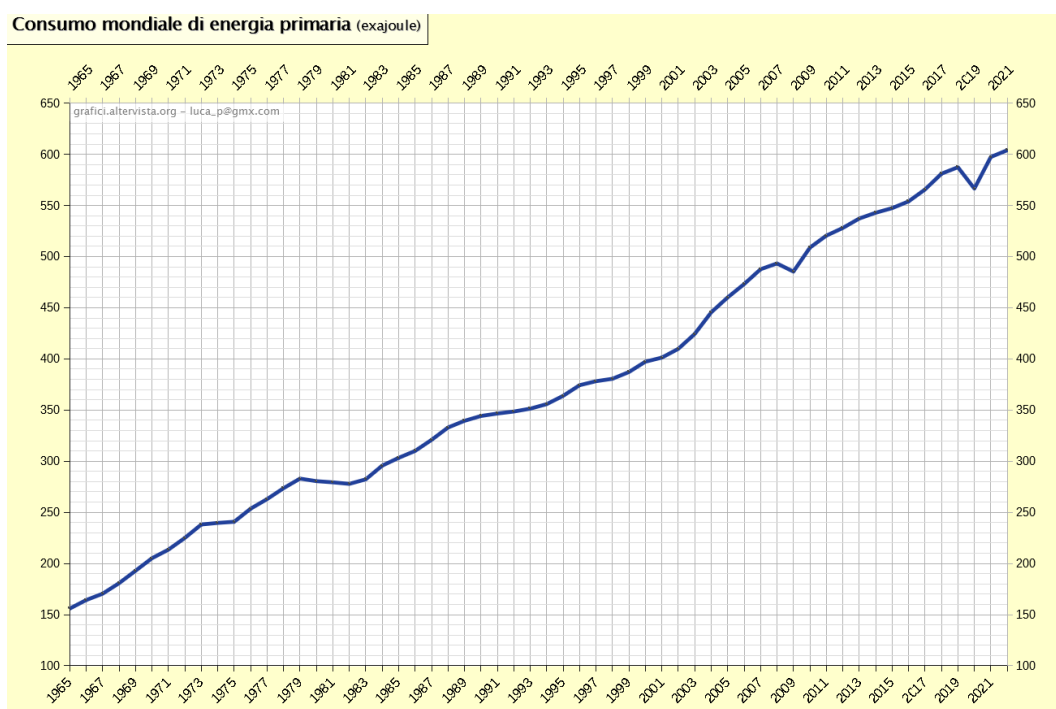
La Rivoluzione Industriale, che ebbe inizio nel XIX secolo, rappresentò il punto di partenza di un drastico aumento dei consumi energetici a livello globale. L'invenzione della macchina a vapore e lo sviluppo dell'industria manifatturiera portarono a una crescente domanda di carbone, facendolo diventare la principale fonte di energia utilizzata.

Il passaggio successivo si verificò tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo, quando l'elettrificazione divenne una forza trainante. Nel medesimo periodo, nonostante l'uso diffuso dell'energia elettrica trasformò molteplici settori, anche l'estrazione e l'utilizzo del petrolio iniziarono a crescere a ritmi importanti, principalmente per alimentare il settore dei trasporti. Questo periodo vide anche l'emergere dell'industria automobilistica.

Successivamente, le due guerre mondiali comportarono un significativo aumento dei consumi energetici, con la produzione di armamenti e l'uso intensivo di veicoli militari.

Negli anni '50, il mondo assistette a un'espansione economica rapida, guidata dalla ricostruzione postbellica, dalla crescita industriale e dalla diffusione delle automobili, con il relativo aumento della domanda energetica.

Figura 1: Consumi mondiali vettori energetici primari



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Gli anni '70, invece, furono caratterizzati dalle crisi petrolifere, che sollevarono per la prima volta le preoccupazioni sulla sicurezza dell'approvvigionamento energetico e la dipendenza dai combustibili fossili, stimolando la ricerca di fonti energetiche alternative e di strategie per l'efficienza energetica, come visto nel capitolo precedente [Capitolo 1.1].

Successivamente, nel corso del XX secolo, l'energia nucleare divenne una fonte promettente, che suscitò non poche preoccupazioni legate alla sicurezza. Nel frattempo, le energie rinnovabili emersero come soluzione per ridurre le emissioni di gas serra e mitigare il cambiamento climatico.

Nel XXI secolo, molte economie emergenti, tra cui Cina e India, registrarono una crescita economica rapida, accompagnata da un aumento significativo dei consumi energetici. Questo ha alimentato la domanda di combustibili fossili, ma ha anche spinto verso investimenti nelle energie rinnovabili.

Nel 2008 e nel 2020 si sono registrati dei cali nei consumi energetici dovuti rispettivamente alla “grande recessione”, nata con i mutui *subprime* in America che ha colpito l'economia mondiale, e alla pandemia legata al COVID 19. Nel 2022, nel pieno della ripresa economica

post-pandemica, l'aumento dei consumi energetici ha subito un brusco rallentamento a causa dell'invasione dell'Ucraina da parte della Federazione Russa.

Negli ultimi anni, l'attenzione globale si è spostata sui problemi del cambiamento climatico e della sostenibilità ambientale, oltre che sull'indipendenza energetica. Questo ha catalizzato gli sforzi per la decarbonizzazione dell'energia e l'adozione di fonti energetiche a basse emissioni di carbonio.

Possiamo affermare che l'evoluzione dei consumi energetici mondiali è stata caratterizzata da una crescita significativa dalla Rivoluzione Industriale ad oggi. Crescita che mai come ora è accompagnata dalla necessità imperativa di una transizione verso fonti energetiche più sostenibili, al fine di affrontare le sfide del cambiamento climatico e garantire un futuro sostenibile per il pianeta. Sarà fondamentale bilanciare la crescita economica con la sostenibilità ambientale, riducendo le emissioni di gas serra e sviluppando fonti energetiche pulite e rinnovabili.

2.2 Analisi delle fonti impiegate per il fabbisogno energetico mondiale

L'evolversi della società, lo sviluppo economico e, non per ultimo, lo sviluppo tecnologico, hanno inciso sulla tipologia e sulla quantità dei consumi. Nei grafici di seguito riportati possiamo vedere come i consumi sono variati nel tempo sia per tipologia che per singolo vettore energetico.

Figura 2: Consumo mondiale di energia primaria per fonte puntuale

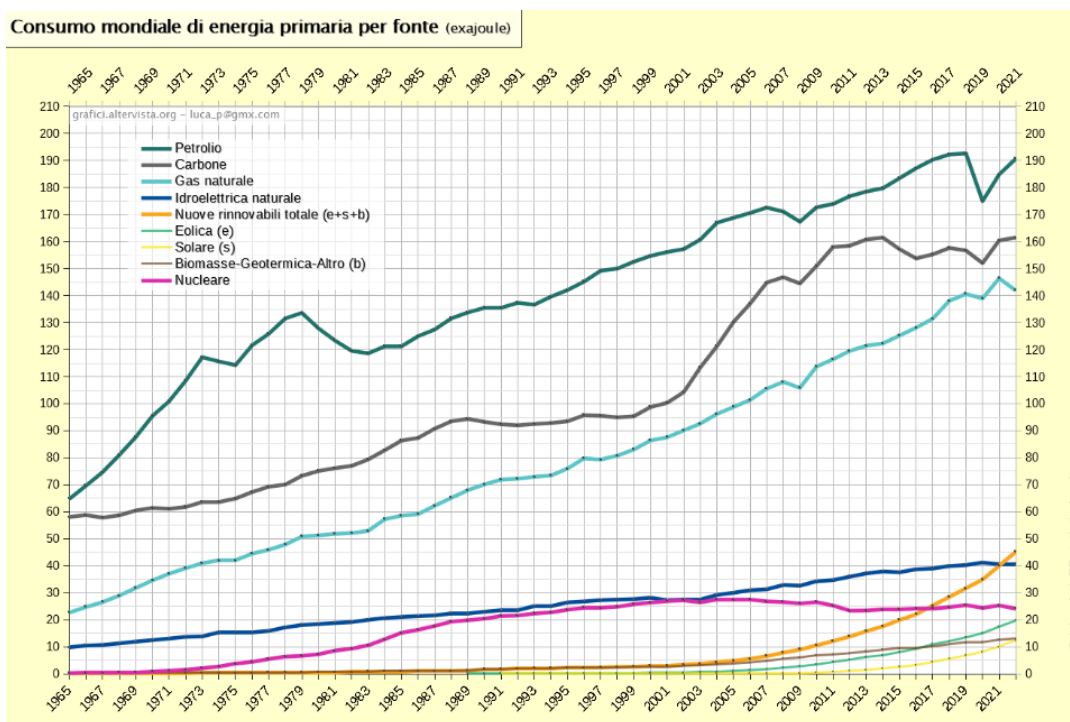
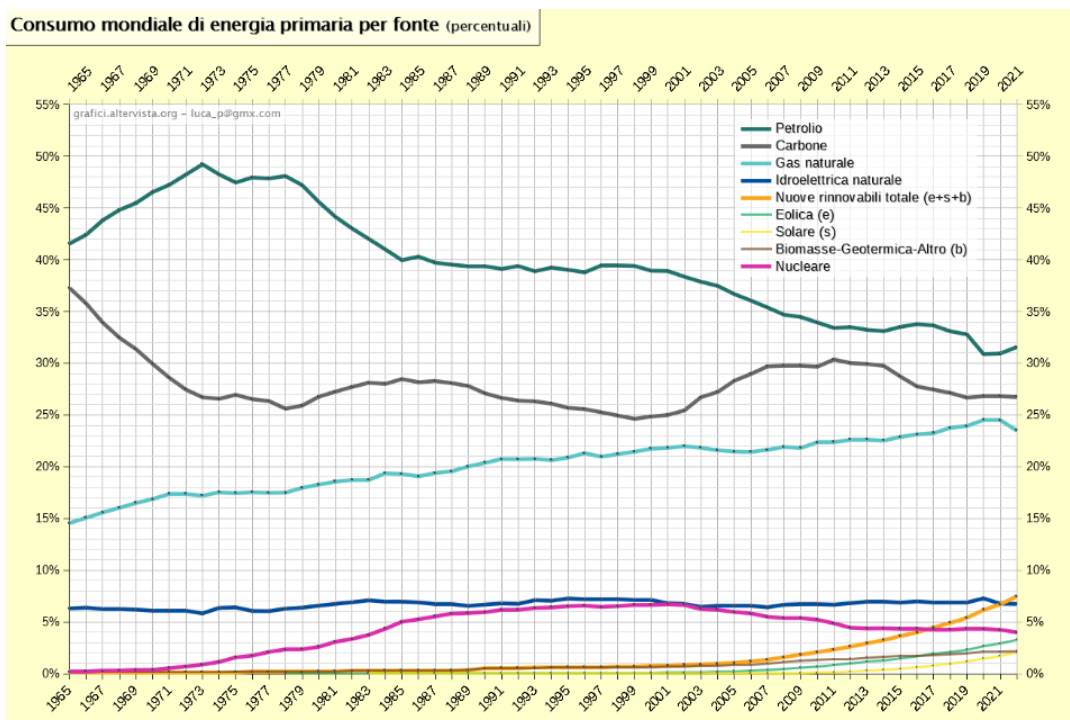


Figura 3: Consumo mondiale di energia primaria per fonte percentuale



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

A colpo d'occhio è facile notare che la fonte energetica più utilizzata è da sempre il petrolio. Si osserva in particolare che l'incremento più rilevante è stato registrato dagli anni '60 fino alle crisi energetiche del 1973 e del 1979, dopo le quali la crescita è continuata ma ad un ritmo decisamente inferiore. E' interessante notare, quindi, come le crisi di quegli anni abbiano di fatto modificato le abitudini di consumo per tutti gli anni a seguire.

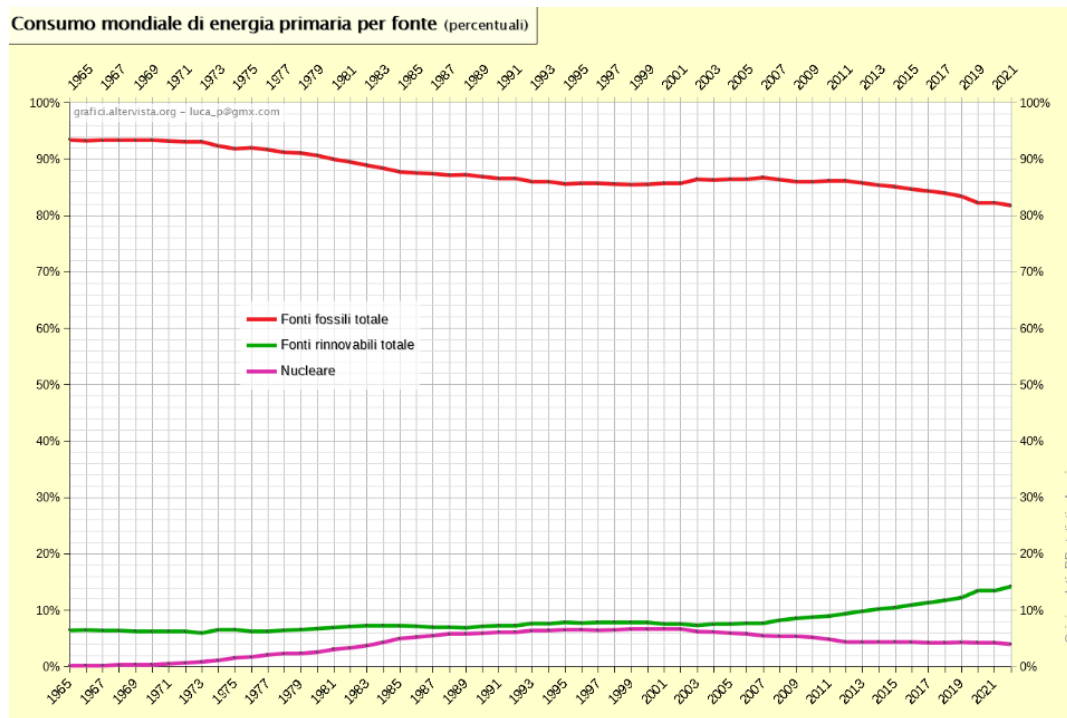
Nel 2022 il consumo di energia da petrolio è stato di 190,7 Exajoule, pari al 31,6% del totale. Come si vede è l'unica fonte fossile che non è ancora riuscita a recuperare completamente quanto perso durante la pandemia da Covid-19.

La rapida crescita dei consumi di carbone registrata a partire dai primi anni 2000 è attribuibile alla conseguenza dello sviluppo economico della Cina e, in minore percentuale, di altri paesi emergenti. Nell'ultimo decennio comunque, è l'unica fonte fossile che non ha una tendenza a crescere. Il consumo pari a 161,5 Exajoule registrato nel 2022, anche se è il massimo storico nella serie di dati analizzata, è comunque identico a quello già registrato nel 2014 dovuto anche alla ripartenza dell'economia mondiale post-Covid e agli effetti del conflitto Ucraina–Russia sugli approvvigionamenti dei combustibili. La quota percentuale nel 2022 è stata del 26,7%.

Il gas naturale invece mostra un andamento costante nella sua crescita senza particolari variazioni ed è l'unica fonte che, nel periodo considerato, riesce ad incrementare la propria quota percentuale. Si notano comunque nel 2022 gli effetti della crisi energetica e della guerra in Ucraina che hanno ridotto i consumi, soprattutto in Europa (come vedremo successivamente). Nel 2022 il consumo di energia da gas naturale è stato di 141,9 Exajoule, pari al 23,5% del totale.

Il nucleare nel 2022 ha contribuito per il 4% del totale, con un apporto energetico pari a 24,1 Exajoule, mostrando un trend in diminuzione negli ultimi 20 anni a causa di politiche socio-ambientali sfavorevoli che hanno rallentato la costruzione di nuovi impianti e all'invecchiamento delle centrali in uso.

Figura 4: Percentuale consumo mondiale macro categorie



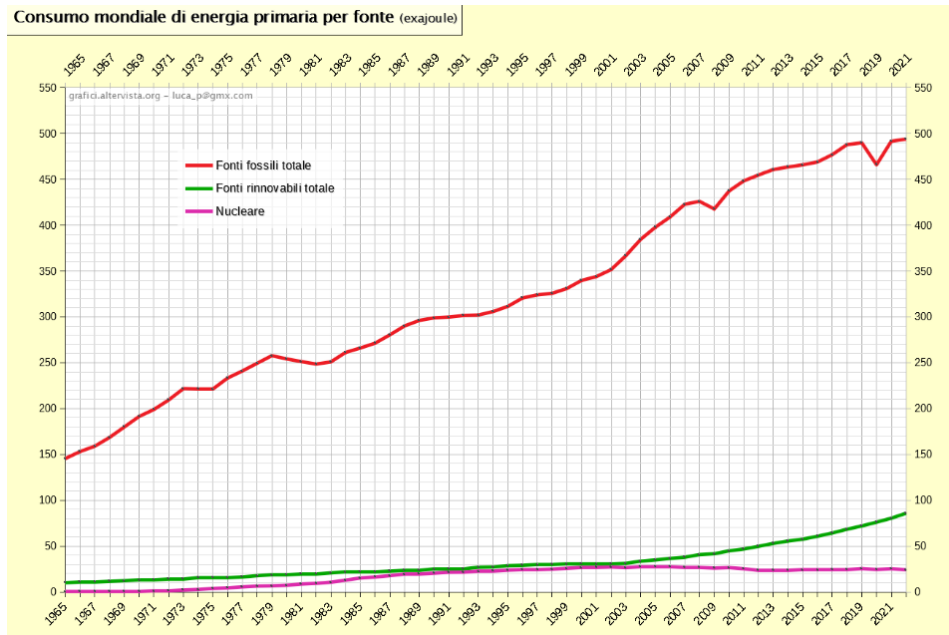
Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Dagli anni 2000 in poi, le fonti rinnovabili sono in forte crescita e guadagnano fette sempre più grandi del mercato energetico. Con l'apporto dell'eolico e del solare, in aggiunta all'idroelettrico (unica fonte rinnovabile non in espansione), oggi rappresentano il 14,2% della fornitura totale. Nel 2022 l'energia eolica forniva il 3,3% del fabbisogno mondiale, quella da fonte solare il 2,1%, il 6,7% l'energia idroelettrica e il restante 2,2% fornito dalle altre fonti rinnovabili come il geotermico e le bioenergie.

Riepilogando, il consumo di energia primaria mondiale registrato nel 2022 è stato pari a 604,09 EJ, derivante dalle seguenti fonti:

- nucleare, 24,1 Exajoule, pari al 4,0% del totale;
- idroelettrica, 40,7 Exajoule, pari al 6,7%;
- eolica, 19,8 Exajoule, pari al 3,3%;
- bioenergie, geotermico e altro, 13,0 Exajoule, pari al 2,2%;
- solare, 12,4 Exajoule, pari al 2,1%;
- nuove fonti rinnovabili totale, 45,2 Exajoule, pari al 7,5%.

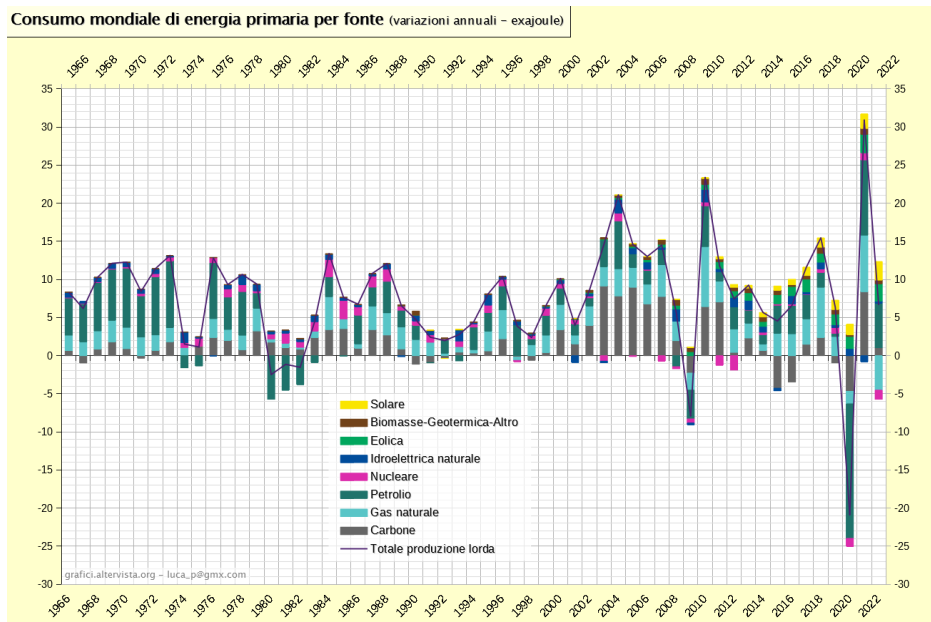
Figura 5: Consumo mondiale puntuale macro categorie



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Nonostante gli sforzi, l'evoluzione tecnologica e gli obiettivi globali volti a ridurre l'inquinamento e, di conseguenza, le emissioni di CO_2 , oggi il mondo è fortemente dipendente dai combustibili fossili, i quali soddisfano circa l'81,8% (pari a 494 EJ) del fabbisogno energetico mondiale con le relative conseguenze per l'ambiente. [10]

Figura 6: Variazioni fonti energetiche utilizzate per fabbisogno mondiale

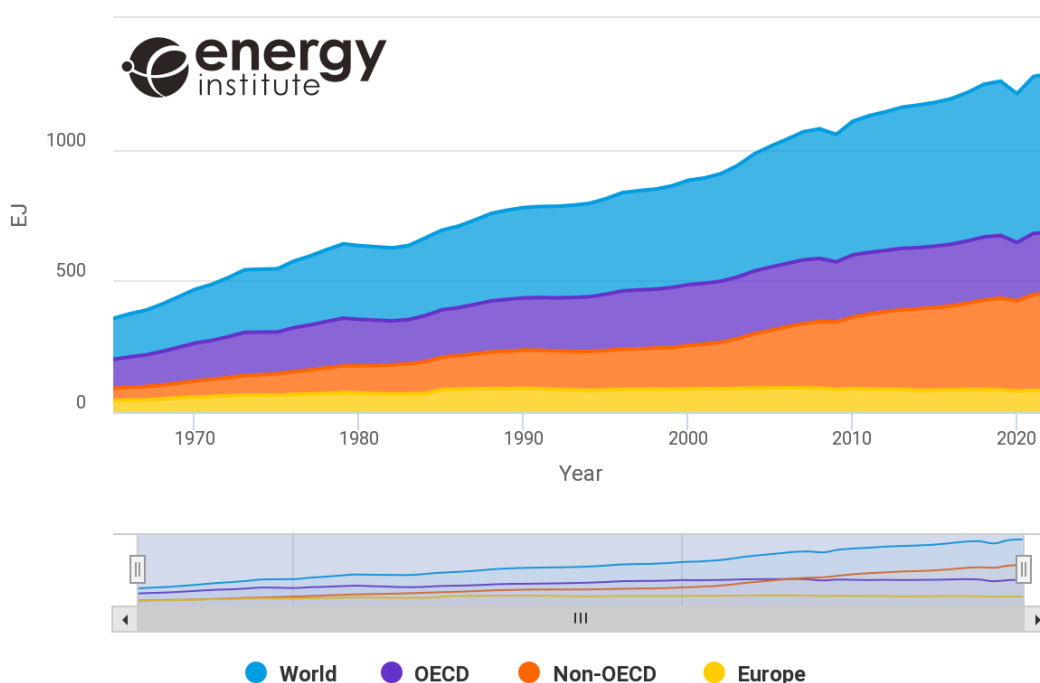


Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Dal grafico riportato in Figura 6 si nota molto bene il recente e progressivo affermarsi delle nuove fonti rinnovabili, anche se la loro presenza non è ancora tale da riuscire a coprire l'incremento medio dei consumi di energia e quindi impedire in modo definitivo la crescita delle fonti fossili.

Nel grafico in Figura 7 di seguito riportato, invece, si nota che la crescita dei consumi non ha caratterizzato indistintamente tutte le economie del globo, ma solo quelle dei Paesi in via di sviluppo e delle “nuove economie emergenti”. La crescita dei consumi di questi ultimi, spinta principalmente dall'utilizzo di fonti non rinnovabili, è stata nettamente superiore ai risultati ottenuti dai paesi sviluppati che hanno investito molto nella riduzione dei consumi e nelle fonti rinnovabili, come l'Unione Europea.

Figura 7: Crescita consumi energetici nel mondo e nelle diverse economie



Fonte: Energy Institute

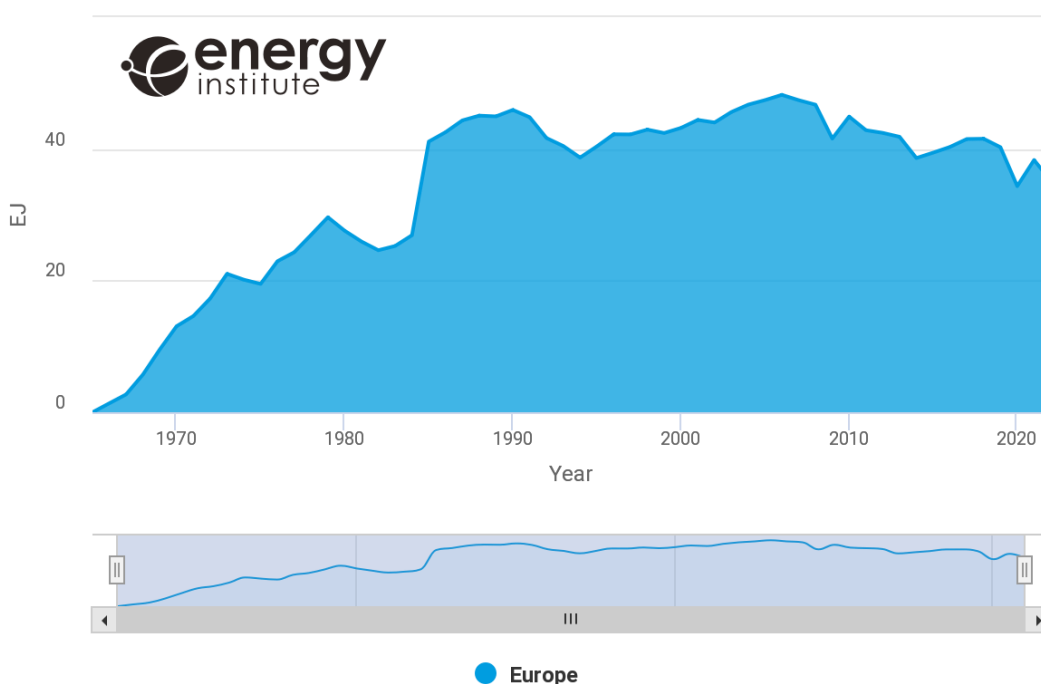
2.3 L'evoluzione energetica dell'Unione Europea

Il panorama energetico europeo è notevolmente diverso rispetto a molte altre regioni del mondo, principalmente a causa della mancanza di abbondanti riserve di combustibili fossili a livello locale. Basti pensare che nonostante gli ingenti sforzi profusi negli anni, nel 2022,

la quota di importazioni nette rispetto alla disponibilità energetica lorda, un indicatore del grado di dipendenza del Paese dall'estero, era pari al 79,7%. [11].

Questa situazione ha spinto l'Europa a diversificare le sue fonti di energia in modo più dinamico rispetto al resto del mondo. Gli effetti della diversificazione, uniti all'efficientamento energetico e alle politiche *green*, dopo il picco di consumi registrato nel 2006 (68,42 EJ), hanno fatto registrare una decrescita dei consumi totali dei vettori energetici primari che, nel 2022, risulta inferiore del 15%.

Figura 8: Consumi europei vettori energetici primari



Fonte: Energy Institute

2.4 Analisi delle fonti impiegate per il fabbisogno energetico europeo

Di seguito è stata evidenziata come è variata la composizione energetica europea nel tempo, mettendo in evidenza gli andamenti dei consumi di tutti i vettori energetici primari, dapprima per singola fonte e, successivamente raggruppandole in fonti rinnovabili, non rinnovabili e nucleare, esplicitando il risultato in termini assoluti e in termini percentuali.

Figura 9: Consumo europeo di energia primaria per fonte puntuale

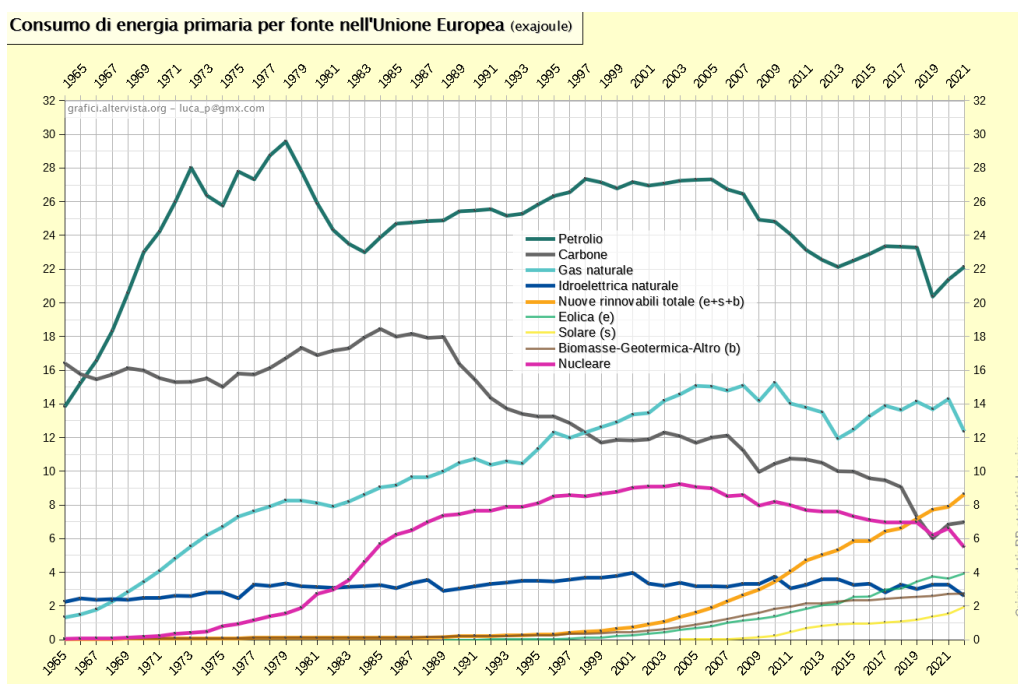
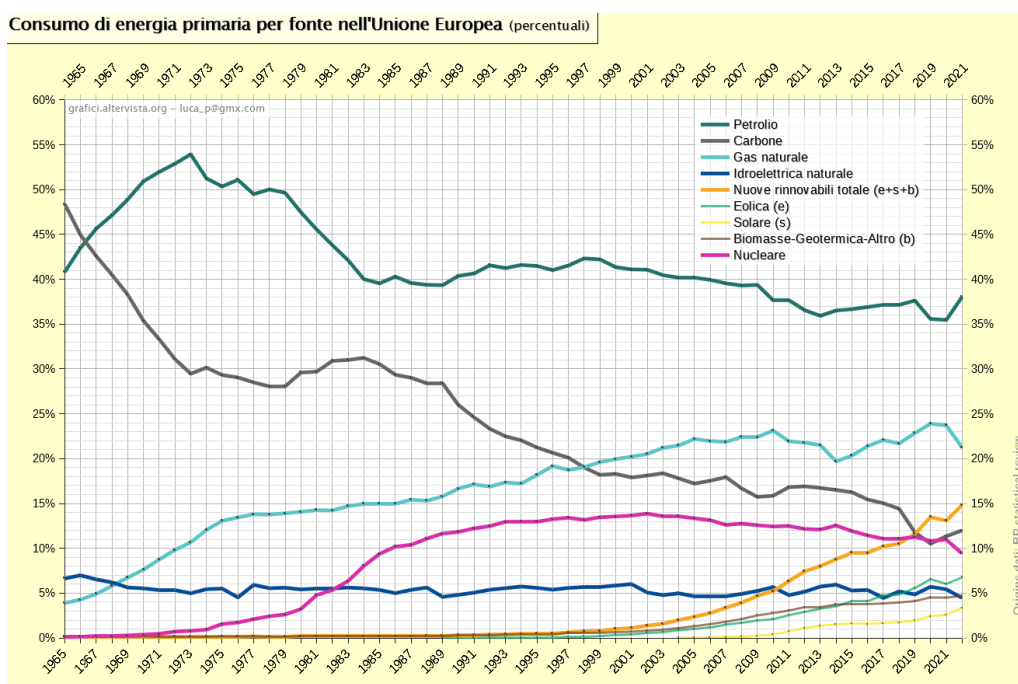


Figura 10: Consumo europeo di energia primaria per fonte percentuale



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Dopo le crisi energetiche del 1973 e del 1979, il consumo di petrolio non ha mai recuperato completamente la sua quota di mercato e, nel 2022, rappresentava il 38,0% del consumo totale di energia in Europa, pari a 22,1 Exajoule.

Il carbone, che era stato ampiamente utilizzato in passato in Europa, ha subito una netta diminuzione a partire dagli anni '90, raggiungendo solo il 12,0% del consumo totale nel 2022, corrispondente a 7,0 Exajoule. Questo declino è stato attribuito all'introduzione tardiva del gas naturale in Europa.

Il gas naturale, nonostante abbia subito una lieve stagnazione dal 2006, è l'unica fonte fossile che ha mostrato una tendenza alla crescita nella maggior parte del tempo. Nel 2022, il consumo di energia da gas è stato di 12,4 Exajoule, pari al 21,2% del totale, nonostante abbia subito un notevole calo a causa della crisi energetica e della guerra in Ucraina.

Le altre fonti energetiche seguono una tendenza simile a quella dell'intero globo, ad eccezione delle bioenergie, che sono utilizzate anche come biocombustibili per il riscaldamento e i trasporti, conferendo loro un valore maggiore in termini di energia primaria.

Riepilogando, il consumo di energia primaria registrato nel 2022 nell'Unione Europea è stato pari a 58,18 EJ, derivante dalle seguenti fonti:

Nucleare: 5,5 Exajoule, 9,4%

Idroelettrica: 2,6 Exajoule, 4,5%.

Eolica: 3,9 Exajoule, 6,8%.

Bioenergie, geotermico e altre fonti: 2,7 Exajoule, 4,7%.

Solare: 1,9 Exajoule, 3,4%.

Totale nuove fonti rinnovabili: 8,6 Exajoule, 14,8%.

Figura 11: Consumo puntuale di energia primaria per fonte nell'Unione Europea

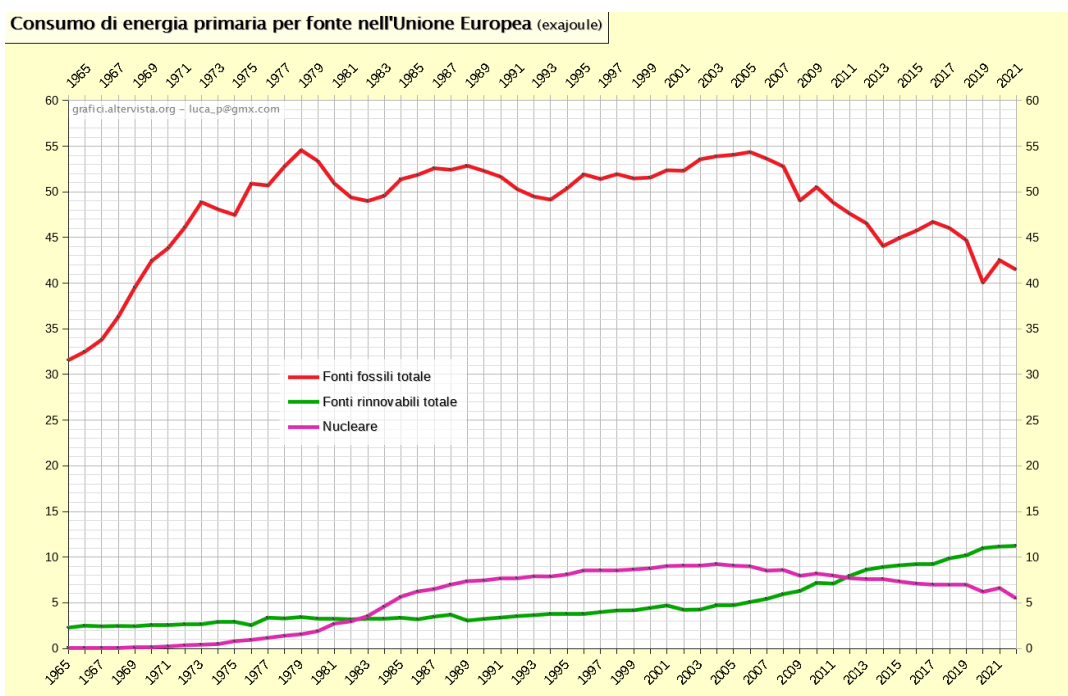
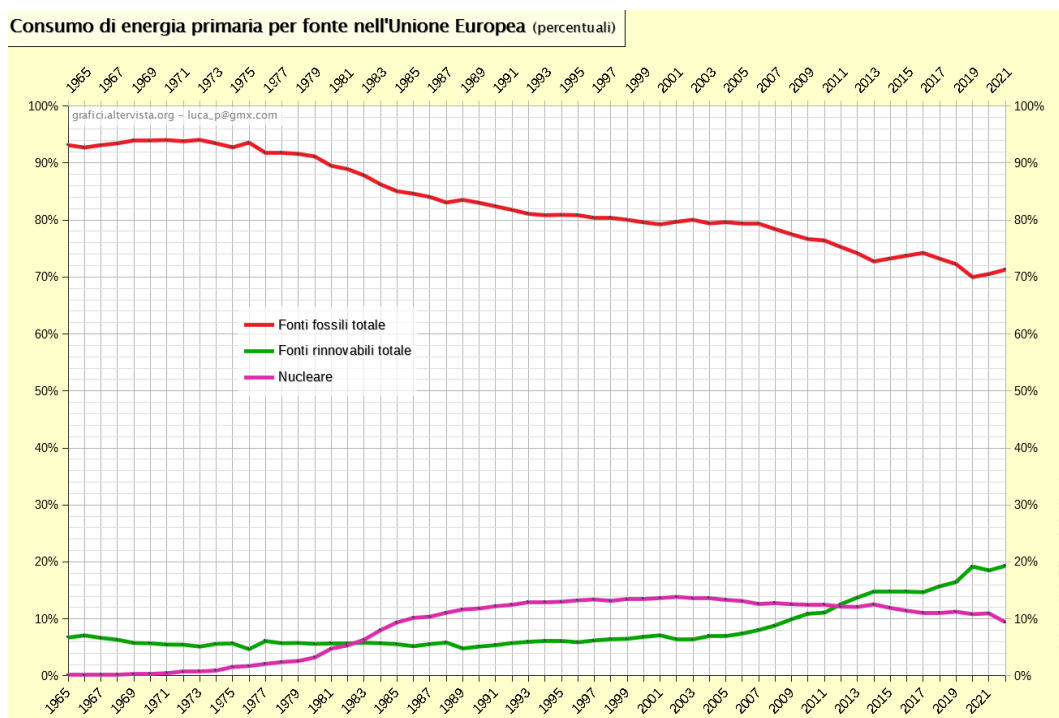


Figura 12: Consumo puntuale di energia primaria per fonte nell'Unione Europea



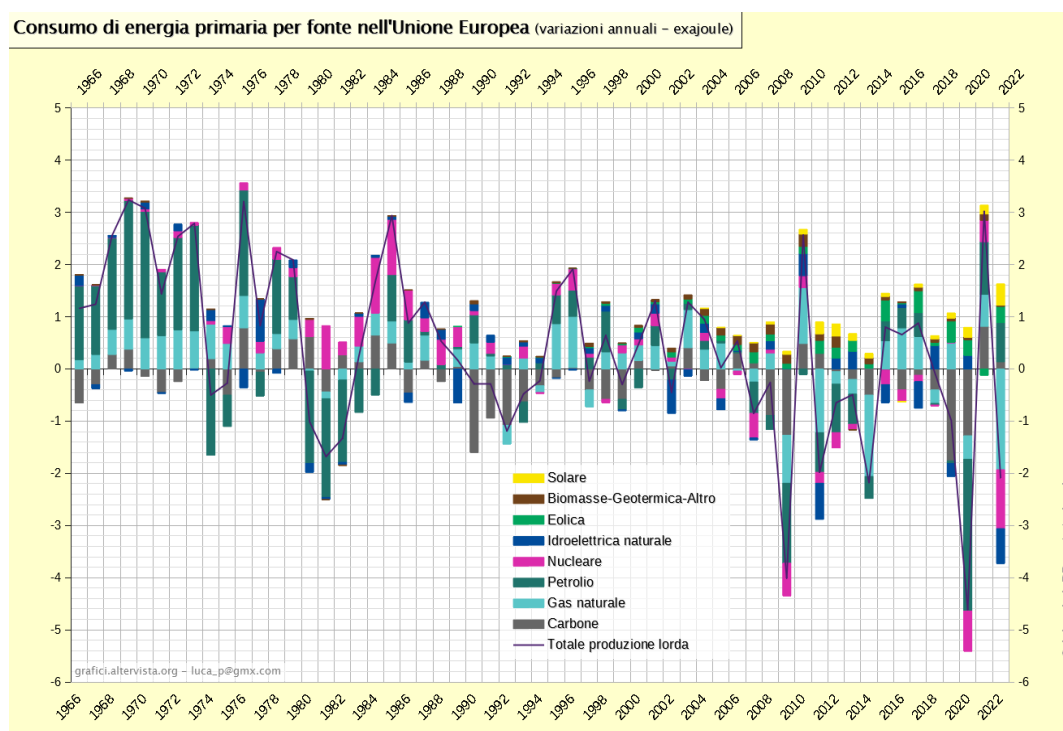
Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

In Europa, a differenza del panorama globale, le fonti fossili hanno smesso di crescere già durante le crisi energetiche degli anni '70 e hanno mostrato una tendenza al declino dal 2007.

Questo è dovuto sia a una diminuzione dei consumi complessivi di energia primaria sia alla crescita delle fonti rinnovabili.

Complessivamente, nel 2022, il consumo di energia da fonti fossili nell'Unione Europea ammontava a 41,5 Exajoule, coprendo il 71,3% del totale, mentre il consumo da fonti rinnovabili era di 11,2 Exajoule, pari al 19,3% del totale. Questa percentuale inferiore di fonti fossili rispetto al panorama globale è attribuibile sia a una maggiore quota di energie rinnovabili ma anche ad una maggiore quota di energia nucleare.

Figura 13: Variazioni fonti energetiche utilizzate per fabbisogno mondiale



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Il consumo di energia in Europa ha subito notevoli cambiamenti nel corso degli anni, con un accentuato spostamento verso fonti energetiche più sostenibili e una diminuzione delle fonti fossili. Questa tendenza riflette la crescente consapevolezza ambientale e la necessità di ridurre le emissioni di gas serra nell'Unione Europea.²

² Tutti i dati trattati nel Capitolo 2 sono derivati dalle elaborazioni del database Statistical Review of World Energy [19] e dal sito <https://grafici.altervista.org/consumo-di-energia-primaria-per-fonte-nellunione-europea-e-nel-mondo/> [10]

Capitolo 3

L'EFFETTO SERRA: IMPATTO SULLA TEMPERATURA

L'effetto serra è un fenomeno naturale, fondamentale per la sopravvivenza della vita sulla Terra. L'aumento delle emissioni di anidride carbonica (CO_2) e di altri gas serra legati all'attività umana, purtroppo, stanno portando a cambiamenti climatici significativi. Il seguente capitolo esplorerà l'effetto serra, le sue cause, le implicazioni delle crescenti emissioni di gas serra, con particolare focus sulla CO_2 . Saranno valutati inoltre gli apporti in tema di emissioni dei vari settori produttivi mondiali e successivamente a livello europeo.

3.1 Cos'è l'effetto serra

L'effetto serra rappresenta un complesso meccanismo di regolazione termica della superficie terrestre. Questo processo coinvolge l'atmosfera terrestre che agisce come una sorta di “coperta termica”, capace di trattenere la radiazione a lunghezza d'onda infrarossa riflessa dalla superficie del pianeta, dagli oceani e dei continenti. L'atmosfera consente di mantenere una temperatura media di circa $15^\circ C$ sulla Terra. Una condizione molto diversa da quella che si avrebbe in assenza di tale meccanismo, dove la temperatura terrestre sarebbe notevolmente più bassa, non consentendo la vita. Tale fenomeno è strettamente connesso alla presenza di determinati gas nell'atmosfera, conosciuti come “gas serra”, che sono in grado di assorbire efficacemente la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre, garantendo l'equilibrio termico del pianeta, trattenendo parte del calore. [12]

Il sole, inviando principalmente radiazioni ad onde corte, è la principale fonte di energia per la Terra. Circa un terzo dell'energia solare raggiunge l'atmosfera terrestre e viene riflessa nello spazio mentre la restante parte viene assorbita dalla superficie terrestre. Al fine di mantenere un equilibrio energetico, la Terra irradia nuovamente nell'ambiente spaziale una quantità equivalente di energia, ma sotto forma di radiazione a lunghezza d'onda più lunga, come i raggi infrarossi. Gran parte di questa radiazione infrarossa viene assorbita a sua volta dall'atmosfera, trattenendola, grazie all'azione dei gas serra che fungono da “coperta

termica” per il nostro pianeta, mitigando la temperatura del globo e rendendola compatibile con la vita.

È possibile distinguere due tipi di effetto serra: quello naturale e quello antropico. L'effetto serra naturale si verifica grazie alla presenza intrinseca di gas nell'atmosfera³. D'altra parte, l'effetto serra antropico è causato dall'attività umana, come ad esempio le emissioni dovute all'uso dei combustibili fossili. Queste attività hanno amplificato l'effetto serra naturale, portando a cambiamenti significativi nei modelli climatici globali, noti come cambiamenti climatici o riscaldamento globale.

3.2 L'atmosfera e la sua composizione

L'atmosfera è una delle componenti del «sistema Terra», come la litosfera, l'idrosfera e la biosfera, con le quali realizza un continuo scambio di materia ed energia. L'atmosfera è un involucro aeriforme che avvolge completamente il pianeta e che partecipa a tutti i suoi movimenti trattenuto dalla forza di attrazione gravitazionale della Terra e da quella centrifuga dovuta alla rotazione terrestre sul proprio asse. [13]

L'atmosfera è per noi di fondamentale importanza perché:

- Protegge la Terra dalle radiazioni nocive provenienti dal Sole;
- Regola il riscaldamento della Terra;
- Contiene l'ossigeno, un elemento indispensabile per la vita animale e vegetale;
- Contribuisce a modellare il rilievo terrestre (attraverso processi chimici di alterazione delle rocce);
- Permette il continuo scambio di acqua tra il mare e le terre emerse attraverso i processi di evaporazione, condensazione e precipitazione.

L'atmosfera non è omogenea e la sua composizione media in volume nella porzione più bassa, presso la superficie terrestre, è la seguente:

- 78,08% di azoto,
- 20,95% di ossigeno,
- 0,93% di argon,

³ I gas serra (ad eccezione dei fluorurati) sono presenti nell'atmosfera da ben prima della comparsa del primo homo sapiens; la Terra li produce attraverso eruzioni vulcaniche, l'erosione rocciosa ed altre attività biologiche.

- 0,03% di anidride carbonica,
- 0,01% altri gas (neon, elio, kripton, xenon, idrogeno, ozono, anidride solforosa, ammoniaca, ossido di carbonio, ecc.)⁴

Fino ai 100 km di altezza non si assiste ad una variazione sostanziale della composizione dell'aria, mentre con l'aumento delle quote, soprattutto a causa dell'aumento della radiazione solare, si assiste alla dissociazione dei gas, causa della variazione delle percentuali delle varie componenti (stato molecolare > stato atomico). All'aumentare dell'altezza diventano sempre più presenti i gas più leggeri.

3.3 I gas serra (*Greenhouse Gases* – GHG)

I gas effetto serra, nonostante siano fondamentali per la terra e il suo ecosistema, rappresentano una piccolissima parte di tutta l'atmosfera⁵. I principali gas che contribuiscono attivamente al cambiamento climatico sono:

- Il vapore acqueo (H_2O): è il gas ad effetto serra più abbondante ed il suo impatto è principalmente influenzato dai cambiamenti in altri gas ad effetto serra. Il riscaldamento globale può influenzare i livelli di vapore acqueo nell'atmosfera creando un feedback positivo che amplifica l'effetto serra;
- L'anidride carbonica (CO_2): è il gas ad effetto serra più noto e oggetto di attenzioni poiché in continuo aumento. È rilasciato principalmente dalla combustione di combustibili fossili come carbone, petrolio e gas naturale, oltre che da cambiamenti nell'uso del suolo, come la deforestazione. Le attività umane sono la principale fonte di aumento dei livelli di CO_2 nell'atmosfera.
- Il metano (CH_4): è un gas ad effetto serra molto potente, anche se è presente in quantità molto minori rispetto al CO_2 . È rilasciato durante la produzione ed il trasporto di combustibili fossili, dalla digestione del bestiame, dalla decomposizione dei rifiuti organici e da processi naturali come, ad esempio, quelli caratteristici delle paludi e dei depositi di gas naturale.
- Il protossido di azoto (N_2O): è rilasciato principalmente da attività umane come, ad esempio, l'uso di fertilizzanti agricoli, la combustione di

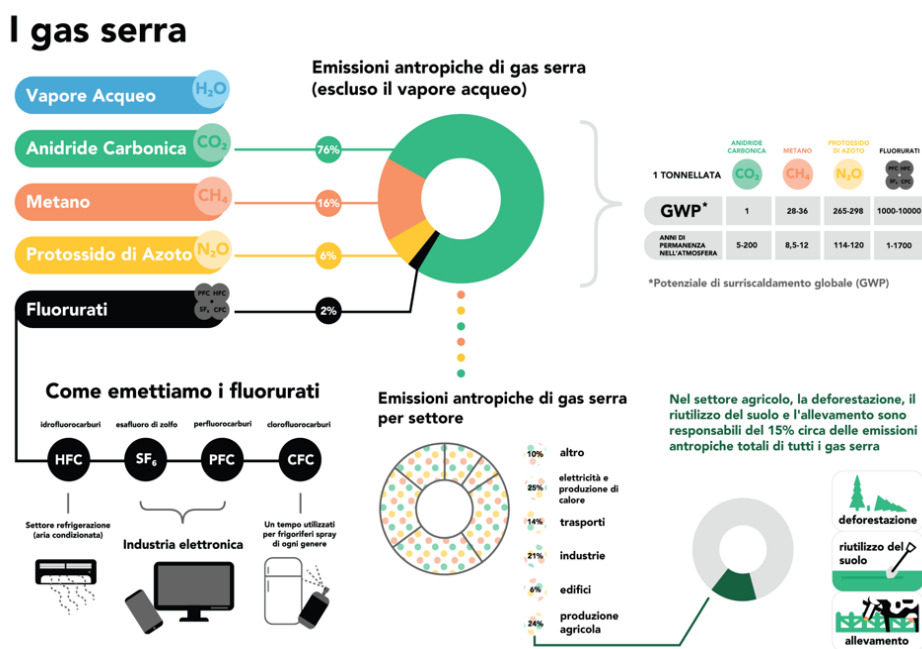
⁴ Oltre a queste componenti ritroviamo una certa quantità di impurezze dette pulviscolo atmosferico.

⁵ Tolto il vapore acqueo, la cui presenza varia tra lo 0 e il 4% a seconda del luogo e delle condizioni atmosferiche, parliamo circa dello 0,10% dell'atmosfera.

combustibili fossili e le pratiche di gestione dei rifiuti. È anche prodotto naturalmente da processi microbici nei suoli e negli oceani.

- I clorofluorocarburi (CFC)⁶: sono gas artificiali creati dall'uomo ed utilizzati in vari prodotti industriali come refrigeranti, schiume isolanti e aerosol. A causa della loro elevata capacità di trattenere il calore, hanno un potenziale di riscaldamento globale molto elevato.

Figura 14: Composizione dei gas serra.



Fonte: <https://www.duegradi.eu/wp-content/uploads/2019/06/gas-serra.pdf>

L'anidride carbonica, il metano e il protossido di azoto, sono naturalmente presenti nell'atmosfera, ma sono anche generati dalle attività umane.

I gas fluorurati a effetto serra sono il tipo più potente e persistente di gas a effetto serra emessi dalle attività umane. Possono produrre un effetto serra migliaia di volte maggiore della CO₂. Inclusi in questo tipo sono idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC), esafluoruro di zolfo (SF₆) e trifluoruro di azoto (NF₃). [14]

⁶ I clorofluoro carburi includono i seguenti gas, ordinati quantità disperse in atmosfera: gli idrofluoro carburi, i perfluorocarburi, gli esafluoruro di zolfo e i trifluoruro di azoto.

3.4 Il riscaldamento globale

Il vapore acqueo è un gas effetto serra e rappresenta la principale causa naturale di questo fenomeno e contribuisce a far aumentare di 21 gradi la temperatura della superficie terrestre rendendola abitabile. L'anidride carbonica, invece, nella sua concentrazione naturale, contribuisce a far aumentare di 7 gradi la temperatura mentre i restanti gas effetto serra fanno aumentare la temperatura complessivamente di 5 gradi. Tutti questi gas, quando presenti in quantità superiori, provocano gravi problemi a tutto l'ecosistema, provocando l'innalzamento delle temperature. [15]

Per poter confrontare l'effetto dei diversi gas serra, il Gruppo intergovernativo di esperti sul cambiamento climatico delle Nazioni Unite (*Intergovernmental Panel on Climate Change*, IPCC) ha definito il cosiddetto "potenziale di riscaldamento globale – PRG" (o *Global Warming Potential - GWP*).

Questo indice misura il potenziale di un gas di contribuire al riscaldamento globale rispetto al CO_2 su un dato periodo di tempo, solitamente 20, 100 o 500 anni. Le emissioni di gas serra possono pertanto essere convertite in "CO₂ equivalenti" e quindi raggruppate e/o comparate. [16]

I "CO₂ equivalenti" vengono altresì definiti con l'abbreviazione "CO₂e"⁷.

⁷ Ad esempio, una tonnellata di gas che ha un potenziale climalterante 21 volte superiore rispetto alla CO_2 , viene contabilizzata come 21 tonnellate di CO_2 equivalente. Fonti: IPCC 2007/2013 [https://www.myclimate.org/it-ch/informarsi/dettaglio-faq/cosa-sono-le-co2-equivalenti/#:~:text=Le%20CO%E2%82%82%20equivalenti%20\(CO%E2%82%82e\)%20sono,e%20il%20protossido%20di%20azoto.](https://www.myclimate.org/it-ch/informarsi/dettaglio-faq/cosa-sono-le-co2-equivalenti/#:~:text=Le%20CO%E2%82%82%20equivalenti%20(CO%E2%82%82e)%20sono,e%20il%20protossido%20di%20azoto.)

Figura 15: GWP dei vari gas

Gas	Ciclo di vita (a.)	GWP 20 a.	GWP 100 a.
Anidride carbonica	50 - 200	1	1
Metano	12	72	25
Ossido di azoto	114	310	298
HFC	1,4 - 270	437 - 12 000	124 - 14 800
PFC	2 600 - 50 000	5 210 - 8 630	7 390 - 12 200
SF ₆	3 200	16 300	22 800
CFC	45 - 1700	5 310 - 11 000	4 750 - 14 400
HCFC	1,3 - 17,9	273 - 5 490	77 - 2 310
Halon	16 - 65	3 680 - 8 480	1 640 - 7 140

Fonte: IPCC 2007

Fonte: <https://www.genano.com/it/infobase/i-gas-effetto-serra-e-i-loro-effetti-nocivi#:~:text=Il%20vapore%20acqueo%20%20C3%A8%20un,la%20temperatura%20della%20superficie%20terrestre.>

Il metano, per esempio, ha un impatto climatico circa 25 volte superiore rispetto all'anidride carbonica, considerando il valore GWP a 100 anni, ma rimane nell'atmosfera meno a lungo (solo 12 anni, rispetto al 50-200 dell'anidride carbonica). L'effetto sul clima del protossido di azoto supera quello del CO_2 di quasi 300 volte.

In altre parole, il GWP indica quanto un particolare gas ha il potenziale di contribuire al riscaldamento globale rispetto al CO_2 su un dato periodo di tempo, solitamente 20, 100 o 500 anni.

Tornando all'esempio del metano, avente GWP pari a 25 per un periodo di 100 anni, ciò significa che questo gas ha un potenziale di trattenere il calore 25 volte maggiore rispetto al CO_2 per quel periodo temporale specifico⁸.

Tuttavia, è importante notare che il GWP non riflette completamente la complessità dei cambiamenti climatici poiché non tiene conto di altri fattori come i tempi di ritenzione nell'atmosfera o le reazioni chimiche che possono influenzare il loro impatto sul lungo termine.

Oltre l'effetto diretto che questi gas causano se presenti in atmosfera, alcuni di essi, sono causa anche dei seguenti "effetti indiretti":

⁸ La misura tiene conto sia della capacità del gas di trattenere il calore che della sua durata nell'atmosfera. Questa valutazione è utile per comparare l'impatto relativo di diversi gas ad effetto serra, considerando che alcuni gas potrebbero avere una maggiore capacità di trattenere il calore, ma possono essere presenti in quantità molto più piccole rispetto al CO_2 .

- ossidi di azoto (NO_x), composti organici volatili (COV) e monossido di carbonio (CO) reagiscono nell'atmosfera e formano l'ozono troposferico;
- il monossido di carbonio (CO) reagisce nell'atmosfera generando l'anidride carbonica;
- i composti organici volatili (COV) generano metano e vapore acqueo;
- l'anidride solforosa (SO_2) reagisce nell'atmosfera e forma aerosol di solfati a effetto raffreddante;
- gli ossidi di azoto e l'anidride solforosa formano aerosol che contribuiscono alla formazione delle nuvole. Questi hanno più un effetto raffreddante che riscaldante del clima.

I gas che contribuiscono al riscaldamento del clima sono il monossido di carbonio (CO), gli ossidi di azoto (NO_x) e i composti organici volatili (COV)⁹. L'ossido di zolfo (SO_2) invece, contribuisce al raffreddamento del clima.

Figura 16 effetti indiretti dei gas effetto serra. Fonte: IPCC 2001

Gas	Ciclo di vita (a.)	GWP 100 a.
Monossido di carbonio (CO)	0,08 - 0,25	40 603
Ossidi di azoto (NO _x)	0,01 - 0,03	40
NMVO* [*]	?	11
Anidride solforosa	?	-

*Composti organici volatili non-metano.

Fonte: IPCC 2001, Ministry of the Environment 1997

⁹ I COV Il metano e i composti organici gassosi sono comunemente definiti come Composti Organici Volatili o COV. Per quanto concerne la valutazione dei gas effetto serra, il metano viene menzionato separatamente come il principale COV rispetto agli altri composti. Spesso viene utilizzata l'abbreviazione NMVOC (Non-Methane Volatile Organic Compounds - Composti Organici Volativi Non-Metano). I COV hanno un impatto diretto perché assorbono le radiazioni solari dal terreno; tuttavia il loro effetto indiretto è ancora più forte. Infatti, reagiscono con i radicali ossidrilici (OH-) presenti nell'aria e formano l'ozono troposferico che è un gas effetto serra. Quando questi raggiungono la stratosfera, reagiscono con OH- formando vapore acqueo, che è un gas effetto serra. I COV vengono inoltre trasformati in metano.

3.5 Le evidenze e gli impatti del cambiamento climatico

Le azioni umane, con il loro modo spesso non sostenibile di gestire l'energia, di cambiare l'uso del territorio e di adottare stili di vita e modelli di consumo non eco-friendly, hanno decisamente dato il loro contributo al riscaldamento globale. Tra il 2011 e il 2020, la temperatura del nostro pianeta è aumentata di $1,09^{\circ}\text{C}$ [$0,95^{\circ}\text{C}$ – $1,20^{\circ}\text{C}$] rispetto al periodo 1850–1900, con un riscaldamento più accentuato sulla terraferma ($1,59^{\circ}\text{C}$) rispetto all'oceano ($0,88^{\circ}\text{C}$). Pare che i gas serra ben mischiati siano stati responsabili di un riscaldamento compreso tra $1,0^{\circ}\text{C}$ e $2,0^{\circ}\text{C}$ in questo arco temporale, mentre altri fattori causati dall'uomo, come gli aerosol, potrebbero aver portato a un raffreddamento tra $0,0^{\circ}\text{C}$ e $0,8^{\circ}\text{C}$. Le influenze naturali, come quelle solari e vulcaniche, sembrano aver inciso sulla temperatura complessiva del nostro pianeta per circa $-0,1^{\circ}\text{C}$ a $+0,1^{\circ}\text{C}$.

Le emissioni totali di CO_2 dall'inizio dell'era industriale fino al 2019 hanno raggiunto $2.400\pm 240 \text{ GtCO}_2$, con oltre la metà (58%) di esse verificatesi tra il 1850 e il 1989, e il restante 42% tra il 1990 e il 2019. Nel 2019, le concentrazioni atmosferiche di CO_2 hanno raggiunto il picco di 410 parti per milione, il valore più alto registrato negli ultimi 2 milioni di anni. Allo stesso tempo, le concentrazioni di metano (1866 parti per miliardo) e protossido di azoto (332 parti per miliardo) hanno superato qualsiasi livello degli ultimi 800.000 anni. Questi dati confermano il legame positivo tra le temperature in aumento e le emissioni.

I cambiamenti veloci e diffusi in atmosfera, oceano, criosfera e biosfera hanno portato a numerosi eventi meteorologici e climatici estremi in tutto il mondo, con impatti negativi sia sulla natura che sulla popolazione. Attualmente, circa 3,6 miliardi di persone vivono in aree ad alto rischio climatico, con una stretta correlazione tra la vulnerabilità umana ed ecologica. Le regioni con notevoli sfide di sviluppo mostrano una maggiore vulnerabilità ai rischi climatici, e i paesi più colpiti sono quelli in Africa, Asia, America centrale e meridionale, nonché le piccole isole e l'Artico. Tra il 2010 e il 2020, la mortalità umana a causa di inondazioni, siccità e tempeste è stata 15 volte superiore nelle regioni altamente vulnerabili rispetto a quelle a bassa vulnerabilità. I danni causati dal cambiamento climatico diventano sempre più irreversibili negli ecosistemi terrestri, d'acqua dolce, criosferici, costieri e oceanici aperti. Gli impatti su alcuni di questi ecosistemi si avvicinano ormai all'irreversibilità, come nei cambiamenti idrologici causati dal ritiro dei ghiacciai e nelle trasformazioni degli ecosistemi montani e artici guidati dal disgelo del permafrost.

Il cambiamento climatico ha compromesso la sicurezza alimentare e idrica, ostacolando gli sforzi per raggiungere gli obiettivi di sviluppo sostenibile. Nonostante un aumento generale della produttività agricola, i cambiamenti climatici hanno rallentato questa crescita negli ultimi 50 anni, colpendo soprattutto le regioni a media e bassa latitudine. Il riscaldamento e l'acidificazione degli oceani (+30%) hanno influenzato negativamente la produzione alimentare dalla pesca e dall'acquacoltura di molluschi in alcune regioni oceaniche. Attualmente, circa la metà della popolazione mondiale sperimenta una grave scarsità d'acqua per almeno una parte dell'anno a causa di fattori climatici. Contestualmente, l'aumento degli eventi di caldo estremo ha causato un aumento della mortalità e la diffusione di malattie infettive in tutte le regioni, con un aumento delle malattie di origine alimentare e idrica legate al clima. Nelle regioni analizzate dall'IPCC, come si evince dalla pubblicazione *“SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)”* [17], anche le sfide per la salute mentale sono correlate all'aumento delle temperature, ai traumi derivanti da eventi estremi e alla perdita dei mezzi di sussistenza e della cultura. Si pensi ai disagi causati dagli sfollamenti dovuti agli eventi climatici avversi in Africa, Asia, Nord America, America centrale e meridionale, con i piccoli stati insulari dei Caraibi e del Pacifico meridionale colpiti in modo sproporzionato rispetto alla loro piccola popolazione.

Il cambiamento climatico ha causato impatti negativi diffusi e perdite distribuite in modo diseguale tra sistemi, regioni e settori. I danni economici sono stati rilevati in settori esposti al clima, come l'agricoltura, la silvicoltura, la pesca, l'energia e il turismo. I mezzi di sussistenza individuali sono stati colpiti attraverso la distruzione di case e infrastrutture, la perdita di proprietà e reddito, con effetti negativi sull'equità di genere e sociale. Nei centri urbani, i cambiamenti climatici hanno influito negativamente sulla salute umana, sui mezzi di sussistenza e sulle infrastrutture chiave. Gli estremi caldi si sono intensificati nelle città, compromettendo le infrastrutture urbane, tra cui trasporti, sistemi idrici, igienico-sanitari ed energetici, con conseguenti perdite economiche, interruzioni dei servizi e impatti negativi sul benessere, in misura maggiore tra i residenti urbani economicamente e socialmente emarginati.

L'Organizzazione meteorologica mondiale (OMM) ha cercato di stimare il costo dei danni materiali causati dai cambiamenti climatici, anche se quelli etici e morali sono difficilmente quantificabili. In particolare, i risultati indicano che 185 eventi meteorologici estremi causati dalla crisi climatica avvenuti tra il 2019 e il 2020 hanno comportato un costo di 2.800

miliardi di dollari. Il 63% di questi costi era associato a perdite umane, mentre il resto riguardava la distruzione di altri beni. Questi eventi hanno coinvolto 1,4 miliardi di persone. Le tempeste sono state responsabili del 64% dei costi climatici, seguite dalle ondate di calore al 16%, mentre le inondazioni e la siccità hanno rappresentato il 20%. Gli incendi boschivi hanno contribuito solo al 2% dei danni. Dai dati disponibili emerge che i paesi ad alto reddito hanno sostenuto il 47% dei costi economici indotti dal cambiamento climatico, nonostante siano in gran parte responsabili di tali cambiamenti. [18]

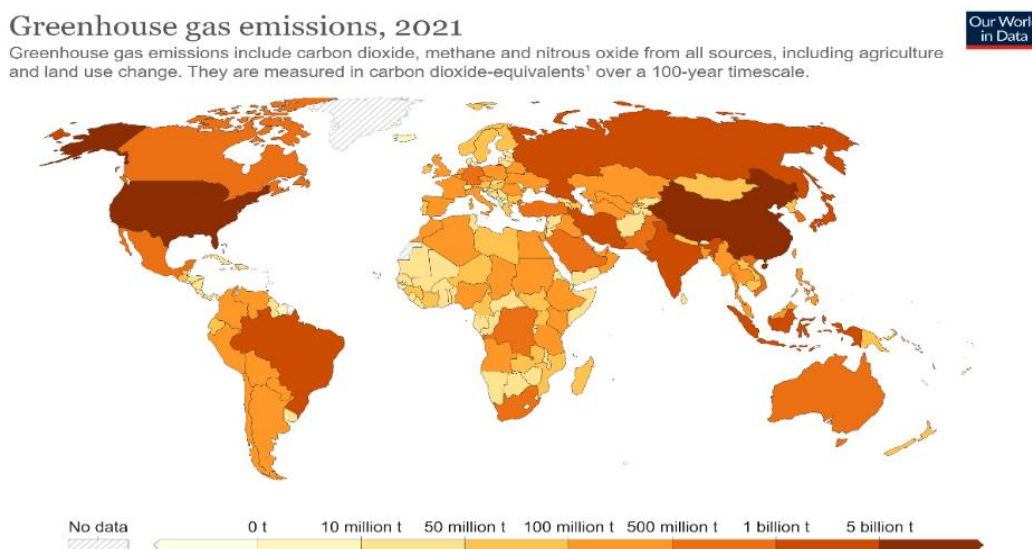
Capitolo 4

LE EMISSIONI DEI GHG

Le emissioni dei gas serra (GHG) attualmente rappresentano una delle sfide ambientali più urgenti. Nel corso del XX secolo è stato registrato un aumento significativo della loro dispersione in atmosfera nonostante ci sia crescente consapevolezza e impegno per invertire questa tendenza attraverso la transizione verso fonti di energia più sostenibili e politiche ambientali più efficaci.

Esse rappresentano una parte cruciale del dibattito globale sul cambiamento climatico e sono strettamente legate alle attività umane che coinvolgono la combustione di combustibili fossili, la deforestazione e altre attività industriali. Come descritto nel capitolo precedente (Capitolo 3.4), questi gas sono i responsabili del riscaldamento globale e dei cambiamenti climatici che stanno caratterizzando il nostro mondo.

Figura 17: Le emissioni di gas serra nel mondo, 2021

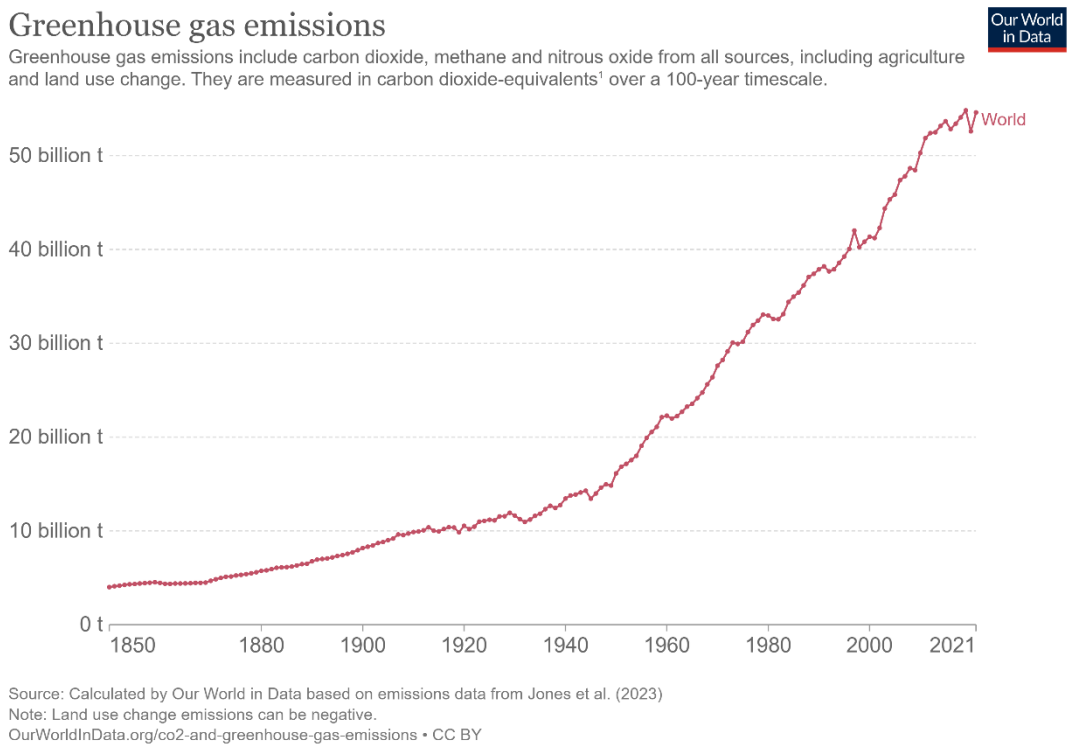


Fonte: <https://ourworldindata.org/greenhouse-gas-emissions>

4.1 Analisi delle emissioni mondiali di GHG

Nonostante gli sforzi profusi negli ultimi decenni, le emissioni dei gas serra continuano a presentare trend positivi e fortemente in crescita. Nel 2021, come evidenziato nel grafico di seguito riportato, ammontavano a circa 54,6 miliardi di tonnellate di CO_2e , che, rispetto a quelle del 2000 risultano cresciute del 32% circa.

Figura 18: Andamento delle emissioni di gas serra

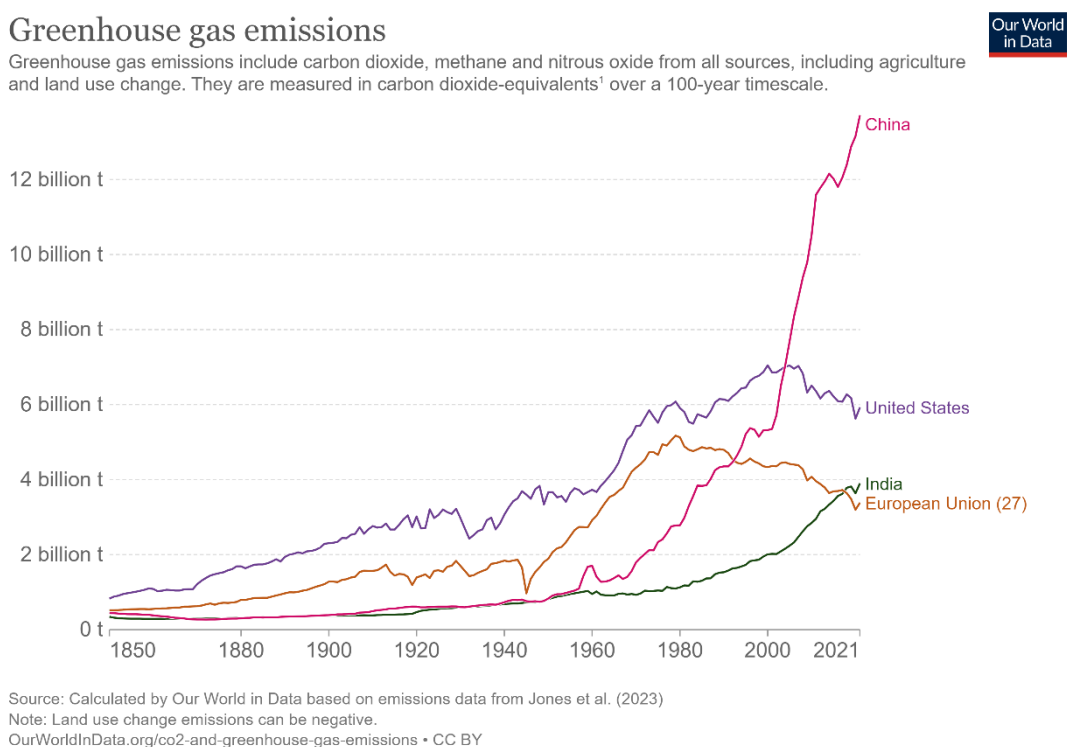


1. **Carbon dioxide-equivalents (CO₂eq):** Carbon dioxide is the most important greenhouse gas, but not the only one. To capture all greenhouse gas emissions, researchers express them in 'carbon dioxide-equivalents' (CO₂eq). This takes all greenhouse gases into account, not just CO₂. To express all greenhouse gases in carbon dioxide-equivalents (CO₂eq), each one is weighted by its global warming potential (GWP) value. GWP measures the amount of warming a gas creates compared to CO₂. CO₂ is given a GWP value of one. If a gas had a GWP of 10 then one kilogram of that gas would generate ten times the warming effect as one kilogram of CO₂. Carbon dioxide-equivalents are calculated for each gas by multiplying the mass of emissions of a specific greenhouse gas by its GWP factor. This warming can be stated over different timescales. To calculate CO₂eq over 100 years, we'd multiply each gas by its GWP over a 100-year timescale (GWP100). Total greenhouse gas emissions – measured in CO₂eq – are then calculated by summing each gas' CO₂eq value.

Fonte: Our World in Data

Spaccettando il contributo globale, è stata stilata la classifica dei Paesi più inquinanti che vede in testa la Cina con il 25,11% rispetto al totale, seguita dagli Stati Uniti con il 10,85%, India 7,15%, e Unione Europea¹⁰ 6,19%.¹¹

Figura 19: Emissioni gas serra per Paese



1. **Carbon dioxide-equivalents (CO₂eq):** Carbon dioxide is the most important greenhouse gas, but not the only one. To capture all greenhouse gas emissions, researchers express them in 'carbon dioxide-equivalents' (CO₂eq). This takes all greenhouse gases into account, not just CO₂. To express all greenhouse gases in carbon dioxide-equivalents (CO₂eq), each one is weighted by its global warming potential (GWP) value. GWP measures the amount of warming a gas creates compared to CO₂. CO₂ is given a GWP value of one. If a gas had a GWP of 10 then one kilogram of that gas would generate ten times the warming effect as one kilogram of CO₂. Carbon dioxide-equivalents are calculated for each gas by multiplying the mass of emissions of a specific greenhouse gas by its GWP factor. This warming can be stated over different timescales. To calculate CO₂eq over 100 years, we'd multiply each gas by its GWP over a 100-year timescale (GWP100). Total greenhouse gas emissions – measured in CO₂eq – are then calculated by summing each gas' CO₂eq value.

Fonte: Our World in Data

¹⁰ Considerata EU 27, ovvero i contributi dei seguenti paesi: Austria, Belgio, Bulgaria, Cipro, Croazia, Danimarca, Estonia, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Irlanda, Italia, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Paesi-Bassi, Polonia, Portogallo, Repubblica Ceca, Romania, Slovacchia, Slovenia, Spagna, Svezia e Ungheria.

¹¹ La classifica cambia in base all'indicatore che viene considerato per la stima: ad esempio se essa è basata sulle emissioni/PIL, ossia le emissioni di CO₂ per unità di prodotto interno lordo; oppure se si fa riferimento alle emissioni pro-capite, un criterio che mette in relazione l'intensità carbonica e la popolazione del Paese preso in considerazione. Riguardo quest'ultimo, ad esempio, gli Stati Uniti con un valore di circa 14,2 tonnellate, supererebbero la Cina, le cui emissioni pro capite sono pari a 8,7 tonnellate.

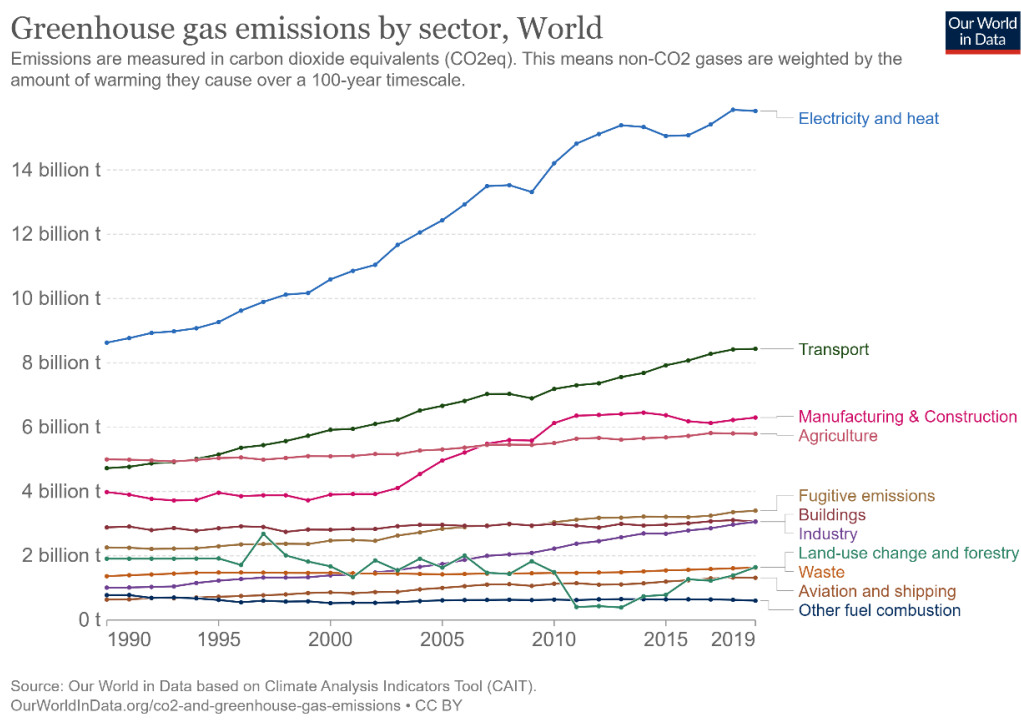
Le emissioni totali contemplate derivano dalla somma delle emissioni di vari gas espresse in tCO_2eq con le seguenti percentuali:

- anidride carbonica - CO_2 : 74,4%
- metano - CH_4 : 17,3%
- ossido di azoto - N_2O : 17,3%
- altri f-gas in tracce più piccoli come gli idrofluorocarburi (HFC) e l'esafluoruro di zolfo (SF_6): 2,1%

4.2 Quale settore inquina di più?

Al fine di poter individuare i perimetri con il più alto impatto ambientale a livello mondiale e provare ad ipotizzare quello che potrà essere il futuro ecosistema terra, l'analisi si è focalizzata sulla provenienza macrosettoriale delle emissioni complessive mondiali dei gas serra.

Figura 20: Emissioni gas serra mondiali per settore produttivo



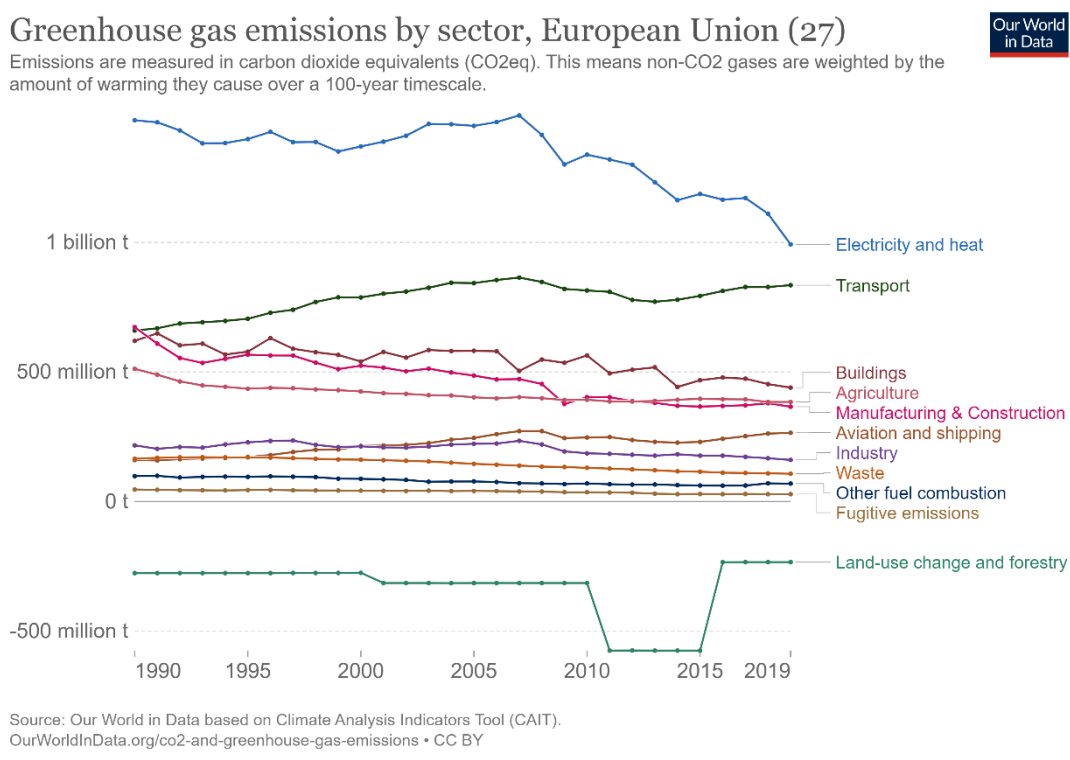
Fonte: Our World in Data

Il risultato ottenuto elaborando il database Our World in Data, riportato in Fig.20 mostra come il maggior apporto è dato dalla produzione dell'energia elettrica e del calore (31%), seguito dal settore dei trasporti (16,52%), l'industria manifatturiera (12,33%), l'agricoltura (11,35%) e, a seguire, i restanti settori come l'edilizia, i rifiuti, l'aviazione e altri.

Trattandosi di un'analisi a livello mondiale, i dati presentati sono la media del contributo di ogni singola nazione. Andando ad analizzare singole realtà non sarebbe difficile riscontrare settori in ordine diverso da quelli medi mondiali. E' importante sottolineare, inoltre, che nei risultati sopra riportati è stato considerato l'apporto totale dei gas effetto serra. Se l'analisi si fosse focalizzata solo su un singolo gas, anche in questo caso, avremmo potuto ottenere risultati diversi, a seconda del Paese considerato e della sua economia.

Di seguito, invece, è riportata la classifica dei settori che emettono più gas serra in Europa, ottenuta elaborando ulteriormente il medesimo database citato in precedenza.

Figura 21: Emissioni gas serra in Europa per settore



Fonte: Our World in Data

Il settore della produzione elettrica e del calore, con il 29,07% delle emissioni totali europee di GHG, risulta essere il più impattante, seguito rispettivamente dal settore dai trasporti

(24,46%), l'edilizia e cemento (12,88%), l'agricoltura (11,26%), il settore manufacturing e costruzioni (10,72%) e tutti gli altri caratterizzati da minori emissioni.

E' fondamentale sottolineare la differenza del trend delle emissioni relativo al settore della produzione elettrica e del calore europeo da quello mondiale. Di fatto la curva relativa al solo Vecchio Continente risulta essere negativa dagli inizi degli anni 2000, evidenziando gli sforzi intrapresi dalla comunità europea per abbatterle, nonostante i continui progressi tecnologici e il continuo aumento del fabbisogno energetico della comunità. Diversamente, quella mondiale, del medesimo settore, presenta un deciso trend crescente dovuto all'aumento della domanda e alle soluzioni poco ecosostenibili utilizzate per soddisfarla, specialmente nelle realtà con economie meno sviluppate.

4.3 La produzione di energia elettrica

Nel presente paragrafo, a seguito dei risultati precedentemente ottenuti è riportata in primo luogo un'istantanea dell'impiego delle fonti attualmente utilizzate per soddisfare la domanda elettrica mondiale e, successivamente, quella relativa al solo fabbisogno europeo. Entrambi i risultati presentati sono stati ottenuti elaborando il dataset pubblicato dall' *Energy Institute Statistical Review of World Energy* presentato nel 2023. [19]

4.3.1 La produzione mondiale di energia elettrica per fonte

Figura 22: Produzione mondiale di energia elettrica per fonte (TWh)

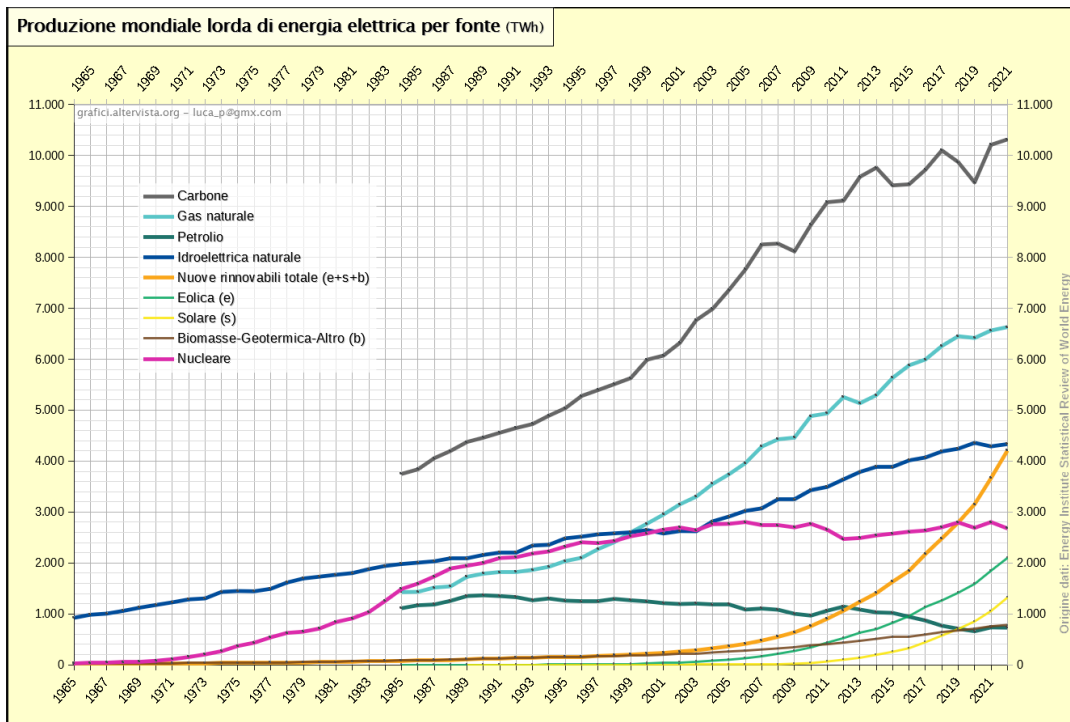
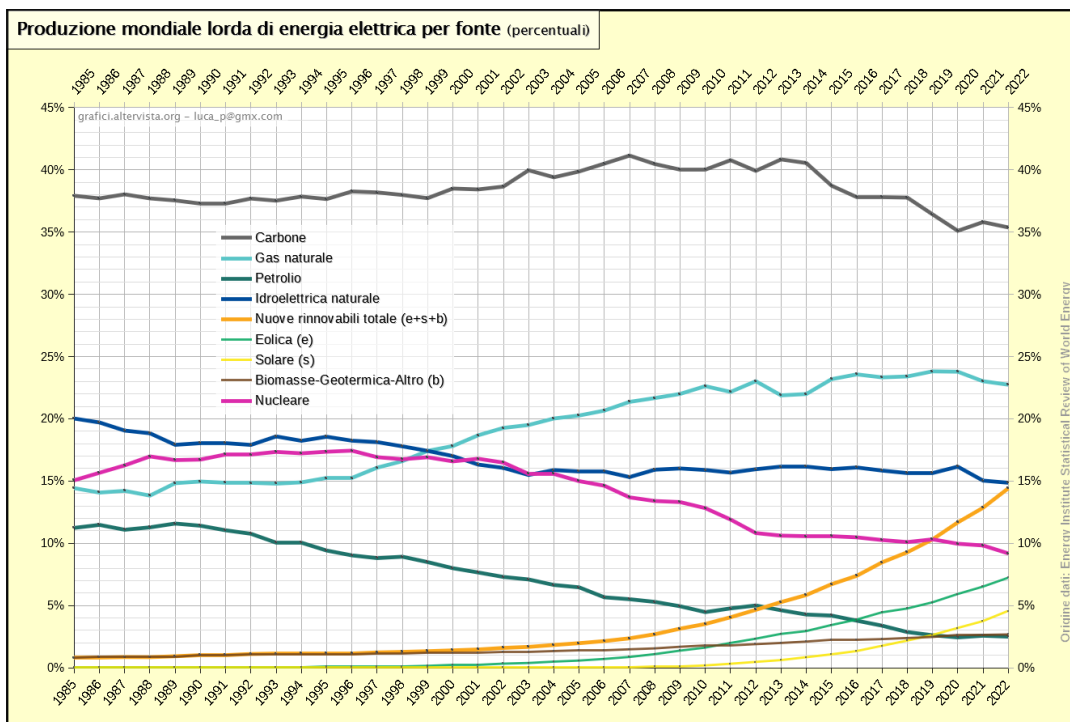


Figura 23: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (%)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Come si evince dai grafici presentati, il ruolo dominante nella produzione di energia elettrica mondiale è stato a lungo ricoperto dal carbone, rendendolo tutt'oggi la fonte più utilizzata in assoluto. Tuttavia, è possibile notare che la situazione è cambiata dopo la crisi globale del 2008, con un rallentamento sia dei consumi complessivi di energia che dell'impiego del carbone, a causa dell'incremento di altre fonti energetiche. Nel 2022, la produzione di energia da carbone ha rappresentato il 35,4% del totale, scendendo dal picco del 41,1% raggiunto nel 2007.

Il gas naturale ha visto una crescita sostenuta a partire dal 1997, diventando la seconda fonte di produzione dopo il carbone. Anche quest'ultimo ha mostrato un rallentamento nella crescita dal 2008, portando la sua quota percentuale al 22,7% nel 2022.

Il petrolio, che aveva conosciuto una fase di crescita dagli anni '60, è stato gradualmente sostituito dal gas naturale negli anni '90. Nel 2022, rappresentava solo il 2,5% della produzione totale.

L'energia idroelettrica, escludendo il pompaggio, è stata a lungo l'unica alternativa ai combustibili fossili. Negli ultimi anni, ha visto un aumento costante, coprendo il 14,9% della produzione nel 2022.

La produzione di energia nucleare ha conosciuto una crescita significativa dagli anni '70 fino agli anni '90, ma poi ha rallentato a causa della mancanza di investimenti e della costruzione di nuove centrali. Nel 2011, in seguito agli eventi di Fukushima, il suo apporto ha iniziato a diminuire, giungendo a ricoprire nel 2022 solo il 9,2% del totale.

Le fonti rinnovabili, incluse l'eolico, il fotovoltaico, le biomasse e il geotermico, stanno crescendo rapidamente. Nel 2022, hanno rappresentato il 14,4% della produzione totale con un aumento medio annuo molto superiore a quello del nucleare nei suoi tempi d'oro. Il rallentamento del carbone e del gas naturale negli ultimi anni di cui si è detto in precedenza è causato in buona parte proprio dalla crescita delle nuove rinnovabili, oltre che da un certo rallentamento della produzione totale dopo la crisi del 2008.

Nel dettaglio, nel 2022:

- l'eolico ha prodotto 2.105 TWh, con una variazione di +250,7 TWh e una quota del 7,2%;
- il solare ha prodotto 1.323 TWh, con una variazione di +263,3 TWh e una quota del 4,5%;

- le bioenergie, il geotermico e altre fonti minori hanno prodotto 777 TWh, con una variazione di +25,7 TWh e una quota del 2,7%.

Figura 24: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (TWh)

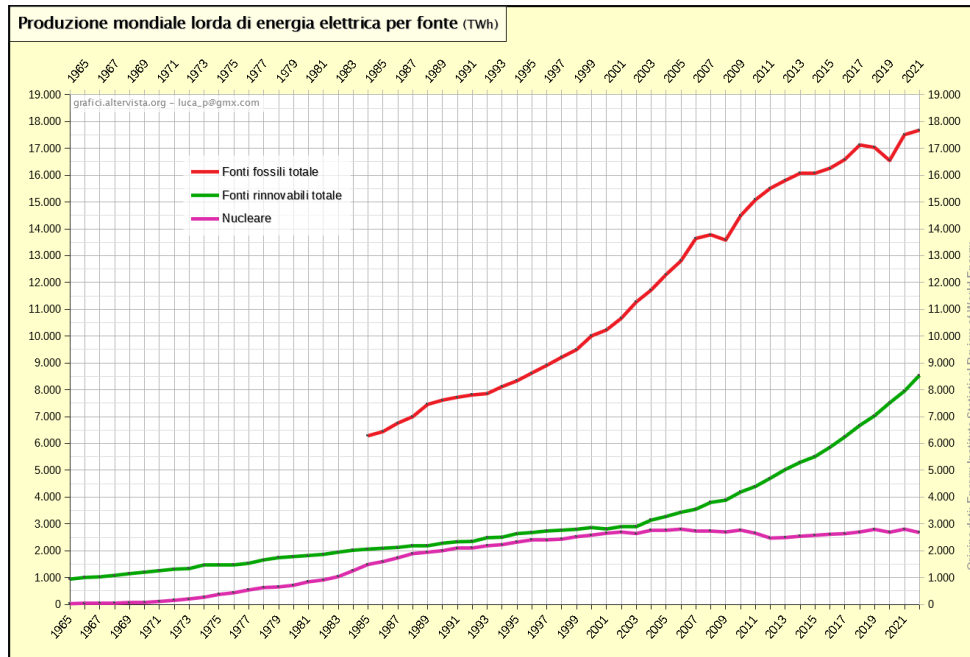
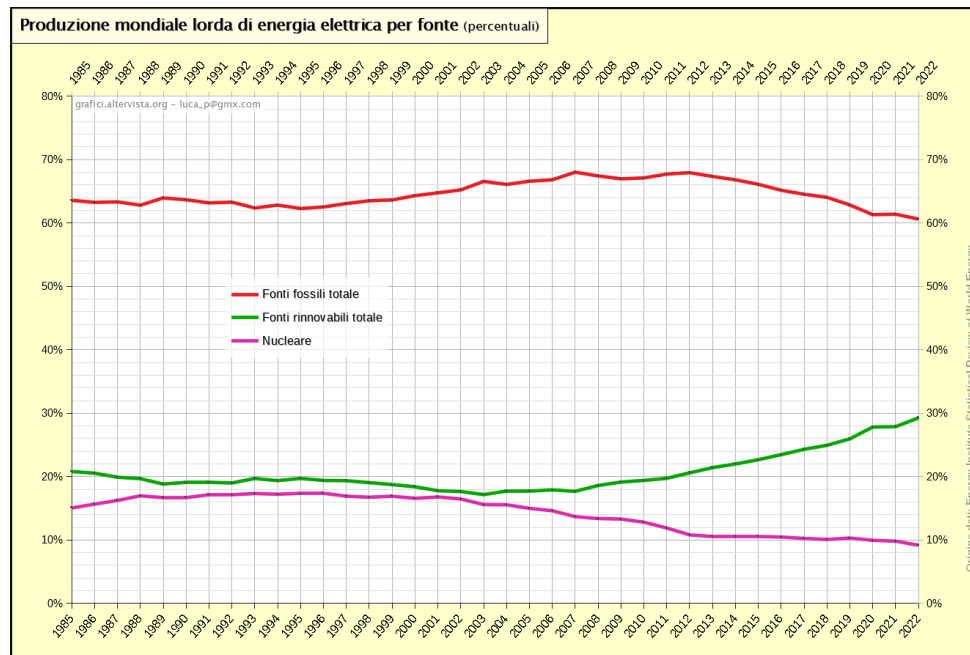


Figura 25: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte (%)



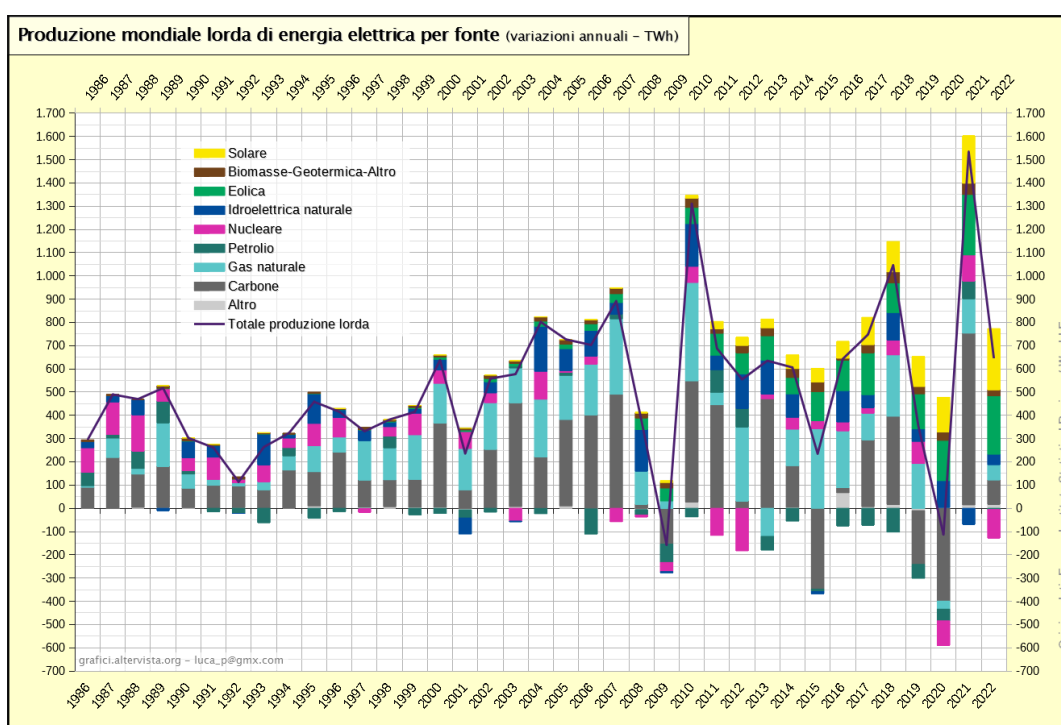
Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

In generale, le fonti termoelettriche basate su combustibili fossili continuano a dominare il settore, coprendo il 60,6% della produzione totale nel 2022. Tuttavia, la loro quota percentuale sta gradualmente diminuendo dal 2013.

Le fonti rinnovabili, nel loro insieme, hanno prodotto il 29,3% dell'energia elettrica nel 2022, dimostrando un notevole potenziale di crescita e un contributo importante alla transizione verso fonti energetiche più sostenibili.

Il grafico di seguito riportato riporta l'evoluzione su base annua delle fonti utilizzate per soddisfare il fabbisogno energetico mondiale.

Figura 26: Produzione mondiale lorda di energia elettrica per fonte

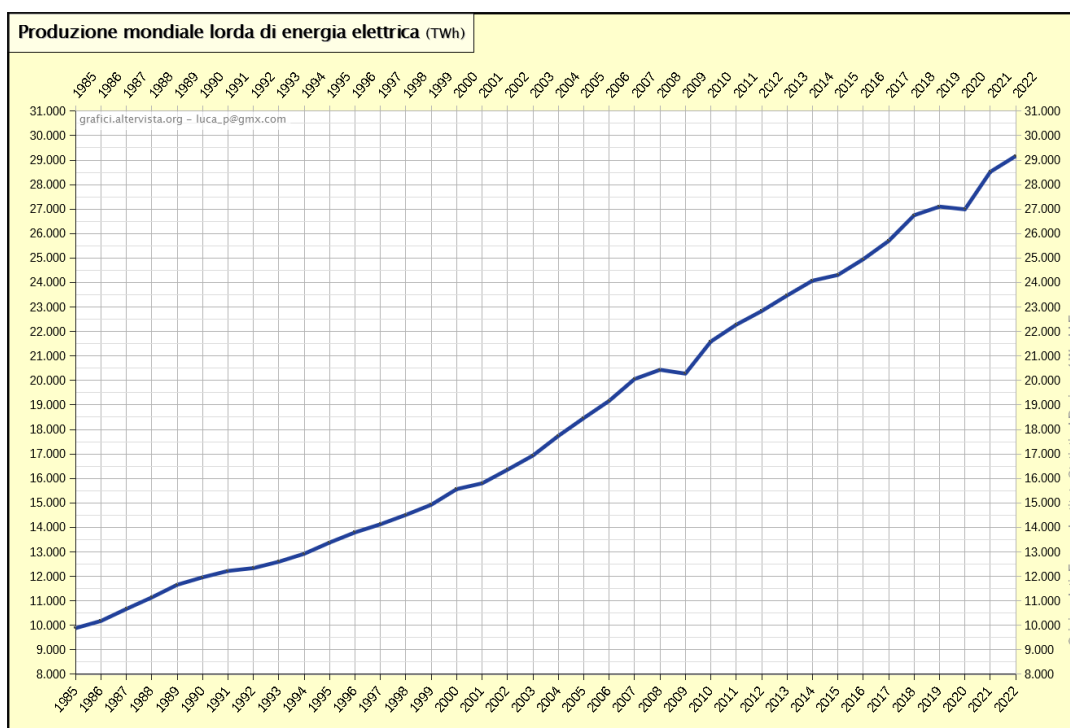


Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Si può chiaramente osservare un progressivo affievolimento della crescita dell'energia nucleare rispetto agli anni '80, una forte crescita delle fonti fossili a partire dagli anni 2000 e l'ascesa decisa delle nuove fonti rinnovabili negli ultimi anni. È importante notare che dal 2011 in poi, l'incremento medio annuale della produzione di energia elettrica totale, e quindi dei consumi, è stato di circa 600 TWh. Questo valore è praticamente equivalente all'incremento della produzione da fonti rinnovabili, che è cresciuto di 585,1 TWh, come già menzionato. Questo significa che le fonti rinnovabili stanno ora iniziando a coprire da sole

l'incremento medio dei consumi globali di energia elettrica, senza la necessità di una crescita ulteriore di altre fonti. In pratica, in questo contesto, le fonti fossili stanno raggiungendo il loro limite di crescita, sia in termini assoluti che in termini di quota percentuale. Naturalmente si tratta di una tendenza media e possono ancora verificarsi eccezioni su base annuale. È interessante notare nel grafico anche la costante crescita dell'incremento nella produzione solare, che mostra un andamento regolare, quasi esponenziale. Di seguito, invece, il grafico sull'andamento della produzione elettrica mondiale, che mostra un trend di crescita positivo e quasi costante.

Figura 27: Produzione mondiale lorda di energia elettrica (TWh)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

4.3.2 La produzione europea di energia elettrica per fonte

La situazione energetica Europea, invece, presenta una notevole dinamicità in contrasto con il panorama globale. Differenze principalmente imputabili alla scarsità di risorse combustibili fossili nel vecchio continente, che ha spinto la Regione a sviluppare fonti di energia alternative.

Figura 28: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (TWh)

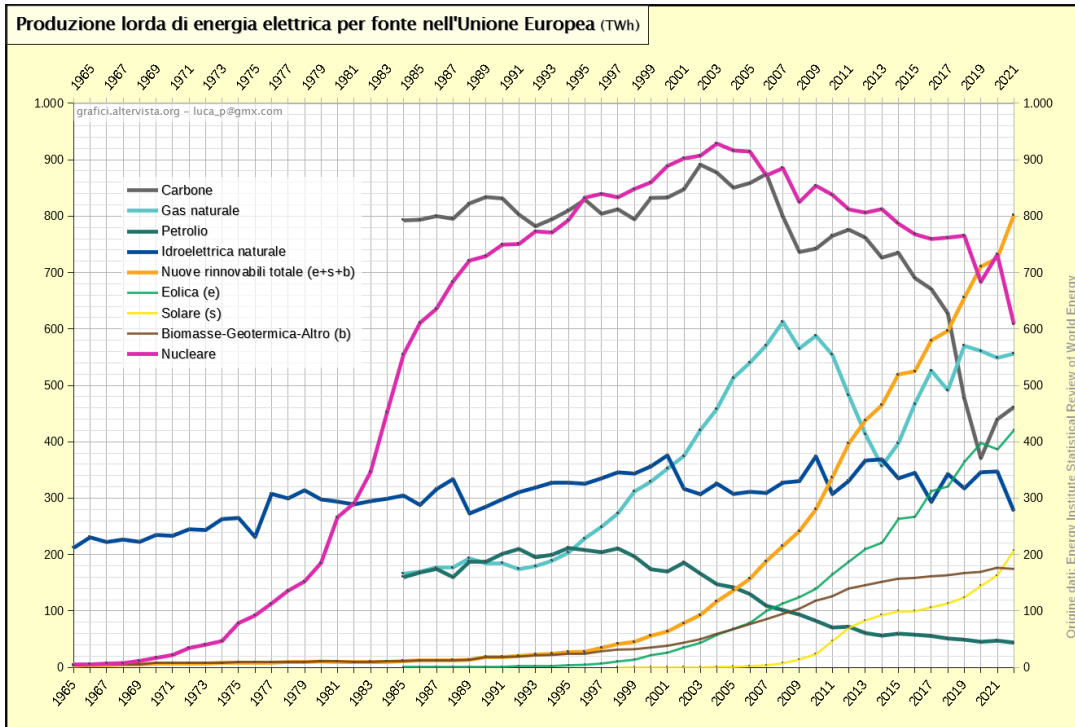
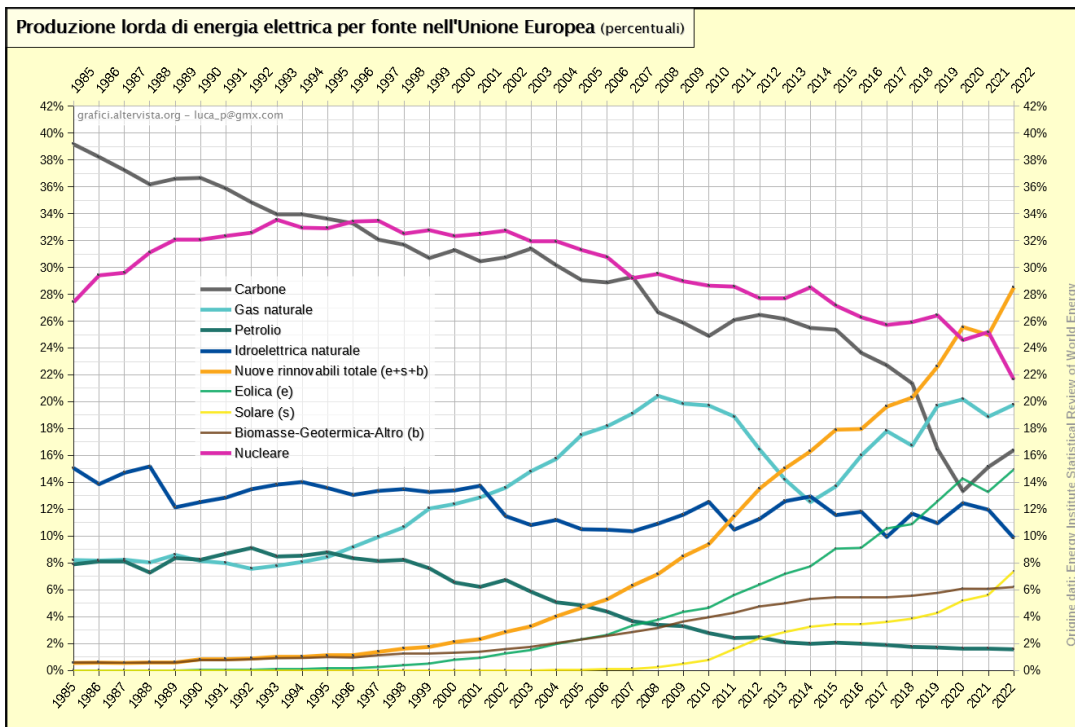


Figura 29: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (%)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Si nota che il settore nucleare ha sperimentato un rapido e significativo sviluppo in Europa, tanto da superare il carbone e diventare la principale fonte di produzione di energia. Tuttavia, a differenza della tendenza globale, ha iniziato a contrarsi a partire dal 2005, ben prima dell'incidente di Fukushima del 2011 che ne ha accelerato il declino, influenzando sulla chiusura anticipata di alcune centrali nucleari in risposta all'incidente. Nel 2022, inoltre, si è verificata una notevole ulteriore riduzione nella produzione nucleare, la più grande mai registrata, a causa di problemi alle centrali nucleari francesi e della fisiologica decadenza del settore nucleare¹². La produzione nucleare è scesa a 609 TWh, con una variazione di -123,1 TWh e una quota pari al 21,6% del totale.

L'uso del carbone, invece, era ancora significativo negli anni '80, superando addirittura la media globale. Tuttavia, nel corso del tempo, l'Europa ha ridotto gradualmente la dipendenza, sostituendolo con energia nucleare, gas naturale e, infine, fonti rinnovabili. Ciononostante, negli ultimi due anni, c'è stato un modesto aumento dell'impiego dello stesso, causato inizialmente dalla ripresa della domanda di energia dopo la crisi del COVID-19 e successivamente dalla crisi nell'approvvigionamento del gas dovuta all'invasione dell'Ucraina da parte della Russia. Ha influito nell'aumento anche la necessità di compensare la forte diminuzione della produzione idroelettrica e nucleare causate da eventi climatici sfavorevoli (innalzamento inaspettato della temperatura). Tuttavia, questo aumento è temporaneo, e nel 2023, con una situazione più stabile e la crescita delle fonti rinnovabili, ci si aspetta un nuovo declino nella produzione di carbone. Nel 2022, la produzione di energia dal carbone è stata di 461 TWh, con una variazione di +21,4 TWh e una quota del 16,4%.

L'uso del gas naturale nell'UE fino agli anni '90 era notevolmente inferiore rispetto al resto del mondo. A partire dal 1993, c'è stata una maggiore enfasi su questo combustibile meno inquinante del carbone, che ha portato a una crescita nel suo utilizzo, contribuendo a riequilibrare la situazione energetica europea. Tuttavia, tra il 2009 e il 2014, c'è stato un calo significativo nell'uso del gas naturale, causato dalla riduzione dei consumi e dalla rapida crescita delle fonti rinnovabili. Le centrali a gas, essendo più flessibili rispetto a quelle a carbone e nucleare, sono state maggiormente colpite da questa tendenza. Dopo il 2015, l'impiego del gas naturale ha ricominciato a crescere a causa della ripresa dei consumi e dell'adattamento delle centrali per competere con le fonti più rigide. Negli ultimi quattro

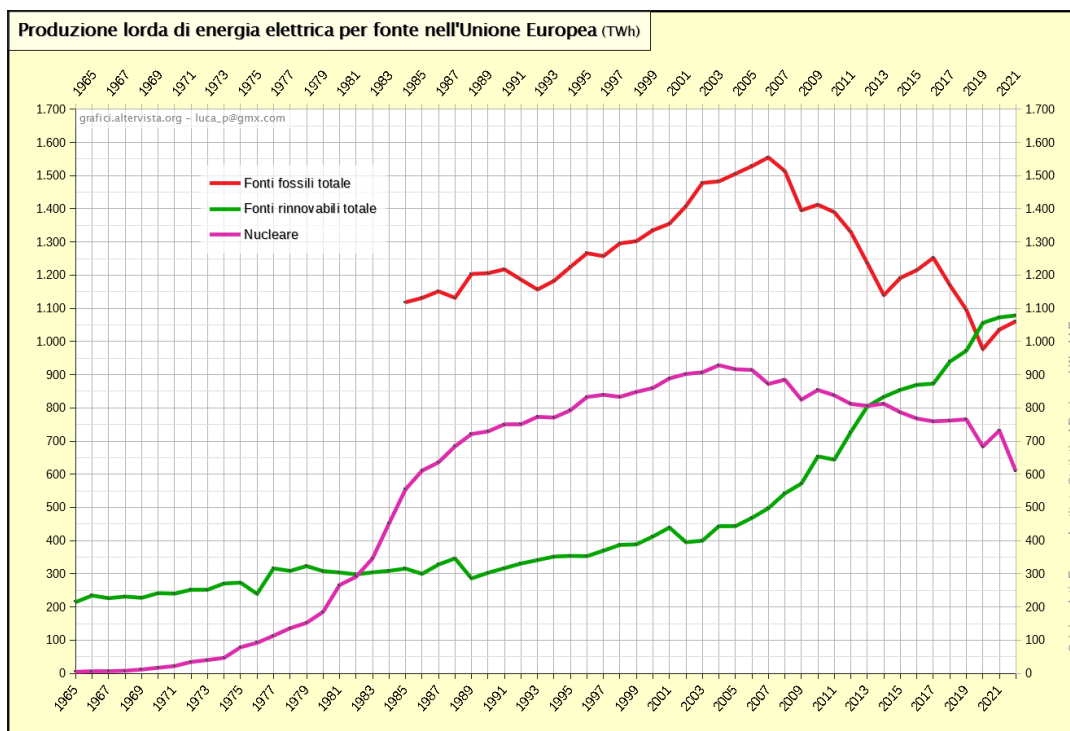
¹² Declino dovuto alla diminuzione degli investimenti nel settore nucleare, al timore circa la sicurezza degli impianti e alla chiusura per fine vita utili delle centrali più datate.

anni, la produzione di energia da gas naturale è rimasta sostanzialmente stabile. Nel 2022, la produzione di energia da gas naturale è stata di 556 TWh, con una variazione di +7,5 TWh e una quota del 19,8%.

L'energia idroelettrica e il petrolio hanno seguito una tendenza simile a livello globale. Nel 2022, l'idroelettrico ha prodotto 277 TWh, con una variazione di -70,4 TWh e una quota del 9,8% (Va sottolineato il significativo calo nella produzione idroelettrica negli anni e le notevoli fluttuazioni annuali, positive e negative, che ne hanno caratterizzato la produzione).

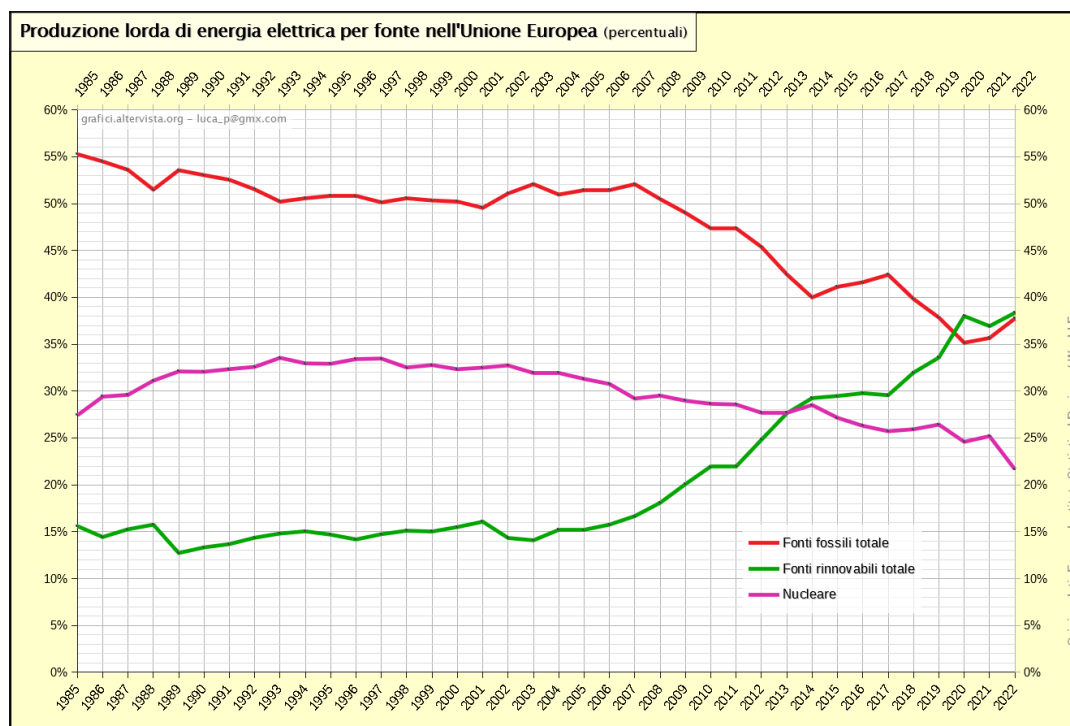
Il petrolio ha contribuito con 44 TWh, con una variazione di -3,4 TWh e una quota dell'1,6%.

Figura 30: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (TWh)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Figura 31: Produzione lorda di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (%)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Nell'Unione Europea, le fonti di energia rinnovabile hanno assunto un ruolo di primaria importanza. La produzione di energia *green* ha superato quella nucleare ed è ora la principale fonte energetica della regione.

Tra le fonti rinnovabili, l'energia eolica è la più rilevante, superando l'energia idroelettrica negli anni precedenti e persino il carbone nel 2020, sebbene sia stato superato da quest'ultimo nel 2021 (anche se temporaneamente). L'energia solare, diversamente, ha mostrato una tendenza alla crescita, con il 2022 che ha registrato il maggiore incremento mai visto. Nel dettaglio, nel 2022, l'energia eolica ha prodotto 421 TWh, con una variazione di +34,2 TWh e una quota del 15,0%. L'energia solare ha contribuito con 207 TWh, con una variazione di +44,1 TWh e una quota del 7,4%. Le bioenergie, il geotermico e altre fonti minori hanno prodotto 174 TWh, con una variazione di -2,0 TWh e una quota del 6,2%.

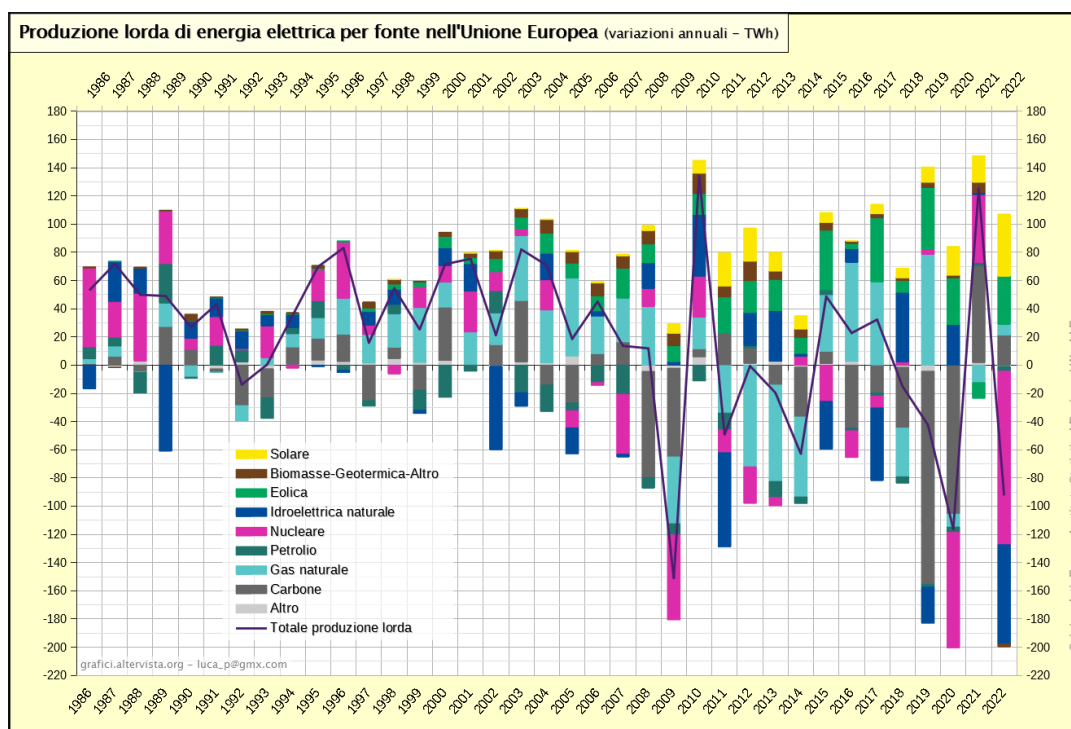
Nel 2022, la produzione totale di energia da fonti rinnovabili è stata di 802 TWh, con una variazione di +76,3 TWh e una quota del 28,5%, molto al di sopra del 14,4% a livello globale.

Complessivamente, l'UE ha sperimentato una tendenza decrescente nell'uso delle fonti fossili a partire dal 2008 diversamente dal contesto globale. Nel 2020, per la prima volta, le

fonti rinnovabili hanno superato le fonti fossili, e questa tendenza dovrebbe continuare nei prossimi anni.

Nel 2022, le fonti fossili hanno contribuito con 1.061 TWh, con una variazione di +25,5 TWh e una quota del 37,7%. Le fonti rinnovabili hanno prodotto 1.079 TWh, con una variazione di +5,9

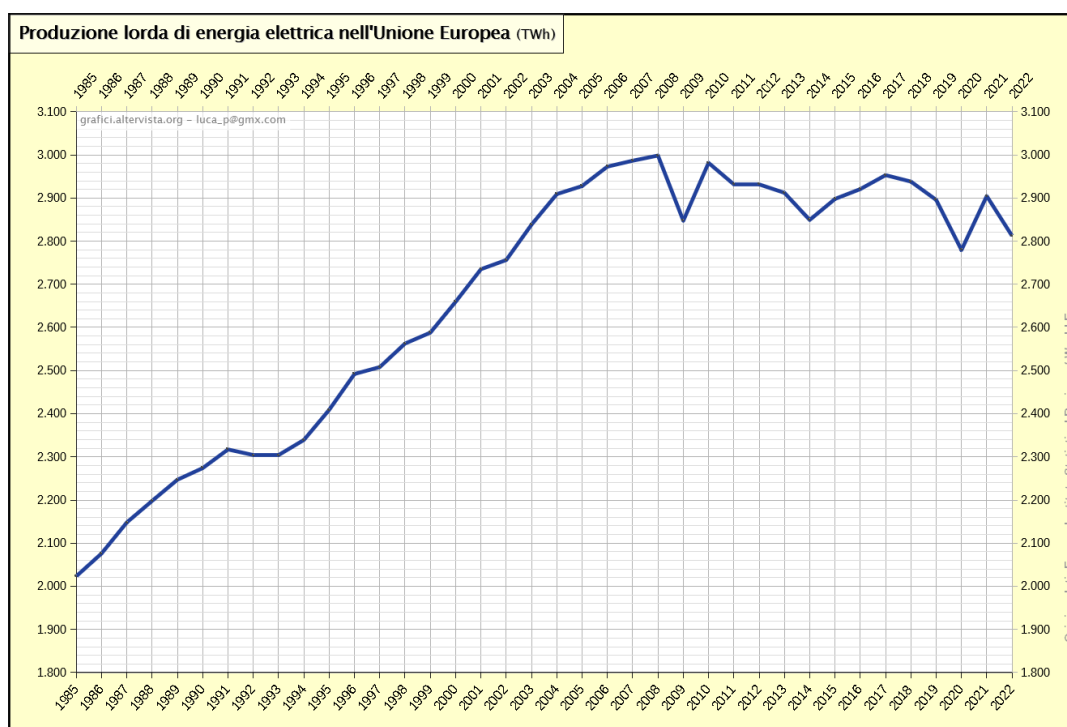
Figura 32: Produzione di energia elettrica per fonte nell'Unione Europea (variazioni annuali)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Anche in questo caso, analizzando le fonti produttive utilizzate su base annua, si possono notare importanti discostamenti dall'andamento mondiale. Le nuove rinnovabili, complice anche una certa riduzione dei consumi, non si limitano ad affiancare le fonti fossili e il nucleare, ma tendono proprio a sostituirsi ad essi.

Figura 33: Produzione lorda di energia elettrica nell'Unione Europea (TWh)



Fonte: Energy Institute Statistical Review of World Energy, 2023

Altra anomalia riscontrata, non di minore importanza, è il trend dei consumi registrati. Infatti, a differenza dei consumi mondiali, quelli europei, a partire dal 2008 sono in diminuzione. [10]

Capitolo 5

IL GREEN DEAL EUROPEO

Attraverso il Green Deal l'Unione Europea vuole farsi promotrice in tutto il mondo delle politiche in materia di ambiente, clima ed energia, consapevole che i paesi europei da soli non potranno produrre un cambiamento significativo per rallentare le emissioni climatiche globali ed il cambiamento climatico in atto. L'Unione Europea infatti intende sfruttare gli strumenti diplomatici e finanziari a sua disposizione per far sì che le “alleanze verdi” diventino parte integrante delle sue relazioni con i paesi limitrofi ed in particolare con Africa, America latina, Caraibi, Asia e il Pacifico. [20]

5.1 Cos'è il Green Deal Europeo

Il Green Deal Europeo rappresenta l'impegno della Commissione Europea nel fronteggiare le sfide legate al clima e all'ambiente. Venne presentato nel dicembre del 2019, da Ursula Von der Leyen divenuta solo pochi giorni prima Presidente della Commissione Europea, come il più ampio e ambizioso programma integrato di riforme, investimenti e ricerca mai concepito dall'Unione Europea. [21]

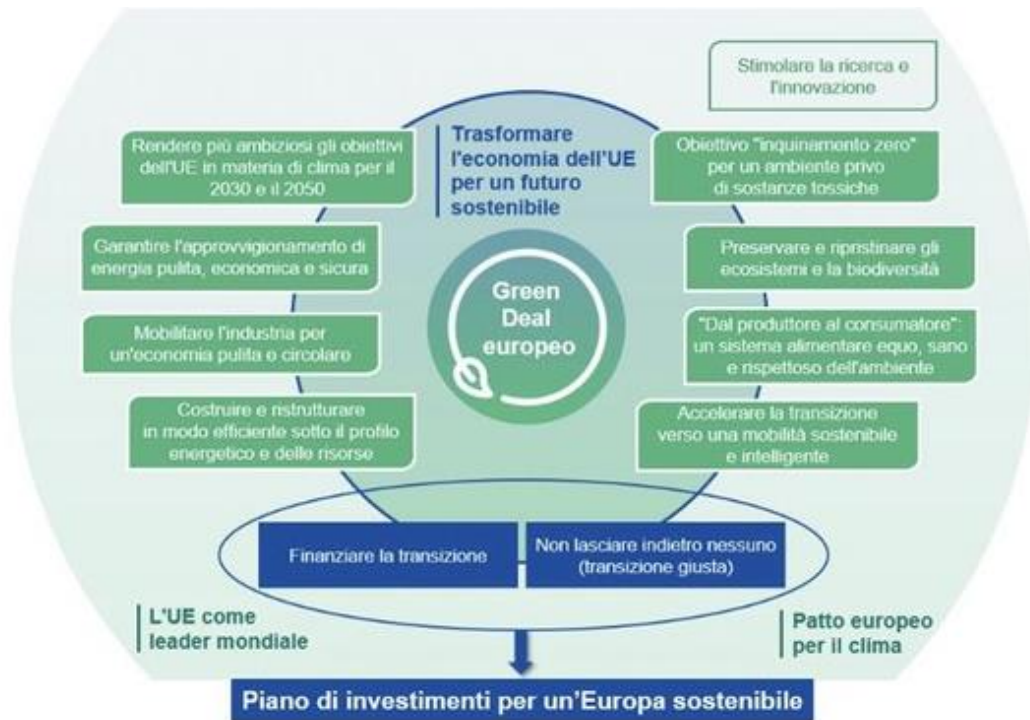
Il nome contiene un chiaro richiamo al *New Deal*, il programma di opere pubbliche e riforme economiche e sociali introdotto tra il 1933 e il 1939 dal presidente statunitense Franklin Delano Roosevelt per risollevare l'economia statunitense dalla Grande Depressione del 1929. Nel caso dell'Europa del XXI secolo, a spingere all'azione e alla concezione del Green Deal non è una crisi già avvenuta e da superare, ma una crisi presente e futura da scongiurare: quella del riscaldamento globale causato dalle attività umane. L'Europa unita vuole non solo contribuire a combattere i cambiamenti climatici, ma guidare la lotta e trasformarla in occasione di crescita economica e di una nuova centralità geopolitica. Questa strategia di crescita ambiziosa mira a trasformare l'Unione Europea, ed il mondo, in una società equa, con un'economia moderna ed efficiente nell'uso delle risorse, al contempo competitiva e orientata verso un futuro sostenibile.

Il pacchetto del Green Deal copre una vasta gamma di settori, tra cui clima, ambiente, salute dei cittadini, energia, trasporti, industria, agricoltura e finanza sostenibile perseguendo l'obiettivo finale di raggiungere, entro il 2050, un contesto socio economico in cui non si generano più emissioni nette di gas a effetto serra e in cui la crescita non dipenda dall'esaurimento delle risorse naturali.

Le principali strategie contemplate includono:

- Incrementare i finanziamenti per la transizione verde e mobilitare almeno 1000 miliardi di euro di investimenti sostenibili nel corso del prossimo decennio, utilizzando il bilancio dell'UE e gli strumenti associati, in particolare InvestEU.
- Creare un quadro che agevoli gli investimenti sostenibili da parte sia del settore pubblico che del privato.
- Fornire supporto alle amministrazioni pubbliche e ai promotori di progetti nella definizione, strutturazione ed esecuzione di iniziative sostenibili.
- Proteggere, conservare e migliorare il capitale naturale dell'UE, preservando la biodiversità e gli ecosistemi.
- Garantire la protezione della salute e il benessere dei cittadini, mitigando i rischi legati all'ambiente e alle conseguenze del cambiamento climatico.

Figura 34 Il Green Deal europeo



Fonte: Ecomondo [22]

5.2 Il piano dell'UE per salvare la Terra

L'Unione Europea, negli anni, ha elaborato una serie di atti e documenti per affrontare i cambiamenti climatici e preservare il nostro pianeta. Queste azioni sono basate su un approccio interdisciplinare, dove l'interdipendenza tra ambiente, economia e salute umana è chiaramente riconosciuta.

Le politiche europee attuali, fondamentalmente, si basano sui principi dell'Agenda 2030¹³ sottoscritta nel 2015 (evoluzione dell'Agenda 2021¹⁴), concentrandosi sulla green economy, l'economia circolare, la tutela dell'ambiente e la salute umana.

Le linee di azione per proteggere l'equilibrio del nostro pianeta includono il risparmio di energia e materie prime, la riduzione dei rifiuti attraverso il riciclo, il riutilizzo e la

¹³ Un piano d'azione per le persone, il Pianeta e la prosperità. È l'Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile, sottoscritta il 25 settembre 2015 da 193 Paesi delle Nazioni unite, tra cui l'Italia, per condividere l'impegno a garantire un presente e un futuro migliore al nostro Pianeta e alle persone che lo abitano. [69]

¹⁴ Un ampio e articolato programma di azione scaturito dalla Conferenza sull'ambiente e lo sviluppo delle Nazioni Unite o Summit della Terra, tenutosi a Rio de Janeiro nel 1992. Esso costituisce una sorta di manuale per raggiungere uno sviluppo sostenibile "da qui al XXI secolo" [70]

riparazione di materiali e beni. Inoltre, si punta a tutelare l'ambiente evitando l'emissione di sostanze inquinanti e a ripristinare la qualità delle aree degradate.

Per realizzare concretamente queste azioni, l'Unione Europea si avvale di strumenti come l'innovazione, la ricerca e la partecipazione dell'intera comunità. E' fondamentale coinvolgere attivamente i cittadini, fornendo loro formazione e consapevolezza, includendoli nei processi decisionali e accogliendo anche le loro proposte.

La ricerca e l'innovazione svolgono un ruolo essenziale nel trovare soluzioni tecnologiche ed economicamente sostenibili per raggiungere gli obiettivi climatici e promuovere la diffusione di tali soluzioni sul mercato.

Nel 2018, con il documento "Un pianeta pulito per tutti - Visione strategica europea a lungo termine per un'economia prospera, moderna, competitiva e climaticamente neutra" [23], l'UE ha espresso la sua idea di strategia per la lotta ai cambiamenti climatici, in linea con i principi dell'accordo di Parigi. In questo testo sul clima sono riportate le azioni chiave per affrontare i cambiamenti climatici, tra cui massimizzare i benefici dell'efficienza energetica nell'edilizia, promuovere l'uso di energie rinnovabili, puntare su sistemi di mobilità a basso consumo di energia, migliorare l'efficienza nell'industria e si punta anche sulla modernizzazione delle infrastrutture di rete e sulla valorizzazione della bioeconomia. La limitazione delle emissioni di anidride carbonica tramite cattura e stoccaggio è considerata essenziale. Si sottolinea l'importanza di avviare tempestivamente le azioni per raggiungere gli obiettivi climatici e incoraggia la partecipazione attiva dei cittadini in questo processo.

Il Parlamento europeo a marzo 2019 ha approvato l'obiettivo di zero emissioni nette di gas serra nella sua risoluzione sui cambiamenti climatici e, successivamente, a gennaio 2020 la risoluzione sul Green Deal europeo. Nel dicembre 2019 il Consiglio europeo ha approvato l'obiettivo di rendere l'UE neutrale dal punto di vista climatico entro il 2050, come condiviso nell'Accordo di Parigi.

Nel marzo 2020 l'Unione Europea ha presentato la sua strategia a lungo termine alla Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici (UNFCCC).

La Visione dell'Unione Europea sul clima prevede azioni chiave e notevoli investimenti aggiuntivi per la modernizzazione e la de-carbonizzazione dell'economia, e si impegna a garantire supporto, trasparenza e finanziamenti adeguati agli stakeholder.

Figura 35: Piano per l'Europa sostenibile



Fonte: Unione Europea

5.3 Le azioni previste dalla legge sul clima

L'approccio alle politiche ed alle azioni necessarie per raggiungere gli obiettivi promossi dal Green Deal è intersettoriale, ovvero un sistema olistico¹⁵ in cui tutto dipende da tutto. L'Europa, il più grande mercato unico al mondo, fissando norme applicabili a tutte le catene del valore, si pone l'obiettivo di incidere significativamente nei cambiamenti di tutte le economie, rendendole più *green*. [22]

Le principali azioni contemplate sono:

- Trasformare l'economia dell'UE per un futuro sostenibile;
- Rendere più ambiziosi gli obiettivi dell'UE in materia di clima per il 2030 e il 2050;
- Garantire l'approvvigionamento di energia pulita, economica e sicura;
- Mobilitare l'industria per un'economia pulita e circolare;
- Costruire e ristrutturare in modo efficiente sotto il profilo energetico e delle risorse;
- Accelerare la transizione verso una mobilità sostenibile e intelligente;
- "Dal produttore al consumatore": progettare un sistema alimentare giusto, sano e rispettoso dell'ambiente;

¹⁵ Olistico è l'aggettivo legato alla teoria dell'olismo, deriva dal greco ὅλος che significa totale, intero, tutto, e si riferisce ad una visione del "tutto" visto come un unicum e non come la somma delle parti di cui è composto.

- Preservare e ripristinare gli ecosistemi e la biodiversità;
- Obiettivo "inquinamento zero" per un ambiente privo di sostanze tossiche;
- Integrare la sostenibilità in tutte le politiche dell'UE;
- Perseguire i finanziamenti e gli investimenti verdi e garantire una transizione giusta;
- "Inverdire" i bilanci nazionali e inviare i giusti segnali di prezzo;
- Stimolare la ricerca e l'innovazione;
- Fare leva sull'istruzione e la formazione;
- Un impegno a favore dell'ambiente: "non nuocere";

Inoltre saranno facilitati e promossi processi inclusivi e accessibili a livello nazionale, regionale e locale, coinvolgendo le parti sociali, il mondo accademico, la comunità imprenditoriale, i cittadini e la società civile. [24]

Tutti gli Stati membri e la Commissione sono stati invitati ad investire nella ricerca e nell'innovazione per riconoscere e anticipare meglio i rischi meteorologici estremi e migliorare le capacità di intervento della protezione civile, promuovendo programmi di formazione ed esercitazione specifici, rendendo la popolazione preparata attraverso iniziative di informazione, sensibilizzazione, formazione ed esercitazioni sugli eventi meteorologici estremi.

5.4 Gli obiettivi da perseguire

Il regolamento sulla normativa europea sul clima ambisce, attraverso imposizioni politiche, ai seguenti obiettivi:

- Raggiungere la neutralità climatica entro il 2050 diventa per l'UE un obbligo giuridico.
- Ridurre le emissioni nette di gas a effetto serra nell'UE di almeno il 55% entro il 2030, rispetto ai livelli del 1990.

Al fine di monitorare l'avanzamento, e dettare i tempi d'azione, la regolamentazione definisce anche il ritmo di riduzione delle emissioni fino al 2050 per garantire prevedibilità alle imprese, ai portatori di interessi e ai cittadini e un sistema per monitorare i progressi compiuti verso il conseguimento dell'obiettivo e riferire in merito a essi. Il tutto al fine di

garantire una transizione verde, efficiente in termini di costi ed equa dal punto di vista sociale. [25]

5.5 Il motore della transizione: i finanziamenti

I finanziamenti e le agevolazioni rivestono un ruolo cruciale nella transizione energetica verso un sistema più sostenibile ed efficiente dal punto di vista ambientale. La transizione risulta fondamentale per affrontare sfide globali come il cambiamento climatico, l'insicurezza energetica e la necessità di ridurre l'impatto ambientale delle attività umane.

I punti chiave sui quali si sottolinea l'importanza dei finanziamenti e delle agevolazioni nella transizione energetica sono:

- La riduzione dei costi di produzione: inizialmente, le tecnologie di energia pulita potrebbero essere più costose rispetto a quelle tradizionali. I finanziamenti pubblici e le agevolazioni fiscali possono aiutare a ridurre i costi di produzione e rendere più competitivi i progetti di energia rinnovabile. Ciò favorirebbe la diffusione di queste tecnologie, rendendole accessibili a un numero maggiore di persone e aziende.
- Promuovere l'innovazione: i finanziamenti e le agevolazioni consentono di sostenere la ricerca e lo sviluppo di nuove tecnologie e soluzioni energetiche. Questo stimolerebbe l'innovazione e favorirebbe l'emergere di tecnologie all'avanguardia, contribuendo a migliorare l'efficienza energetica e a ridurre ulteriormente le emissioni di gas serra.
- La creazione di posti di lavoro: la transizione energetica porta con sé nuove opportunità di lavoro nel settore delle energie rinnovabili e delle tecnologie sostenibili. I finanziamenti pubblici possono aiutare a creare posti di lavoro verdi, sostenendo industrie emergenti e sviluppando competenze nel settore delle energie pulite.
- La diversificazione dell'economia: la transizione energetica può aiutare a ridurre la dipendenza dalle fonti di energia tradizionali e importate. Gli investimenti nelle energie rinnovabili e nelle tecnologie verdi promuovono la diversificazione dell'economia, riducendo la vulnerabilità rispetto a fluttuazioni dei prezzi delle materie prime e a interruzioni delle forniture.

- L'impatto ambientale positivo: la riduzione delle emissioni di gas serra e l'adozione di tecnologie a basso impatto ambientale sono essenziali per mitigare il cambiamento climatico e per preservare l'ambiente. I finanziamenti e le agevolazioni incentivate possono accelerare questa transizione e portare a un impatto ambientale positivo a lungo termine.
- Il coordinamento internazionale: la transizione energetica richiede un coordinamento internazionale per affrontare le sfide globali. I finanziamenti internazionali e le agevolazioni possono sostenere progetti di cooperazione e sviluppo condivisi, promuovendo soluzioni energetiche sostenibili a livello globale.
 - Gli incentivi sugli investimenti: sono richiesti ingenti investimenti in nuove tecnologie, infrastrutture e soluzioni energetiche sostenibili. Solo adeguati finanziamenti e agevolazioni fiscali possono incentivare sia il settore privato che il settore pubblico a investire in progetti di energia pulita a lungo termine. Senza queste agevolazioni, molte iniziative di energia sostenibile potrebbero essere poco attraenti dal punto di vista economico e rischierebbero di non essere realizzate.

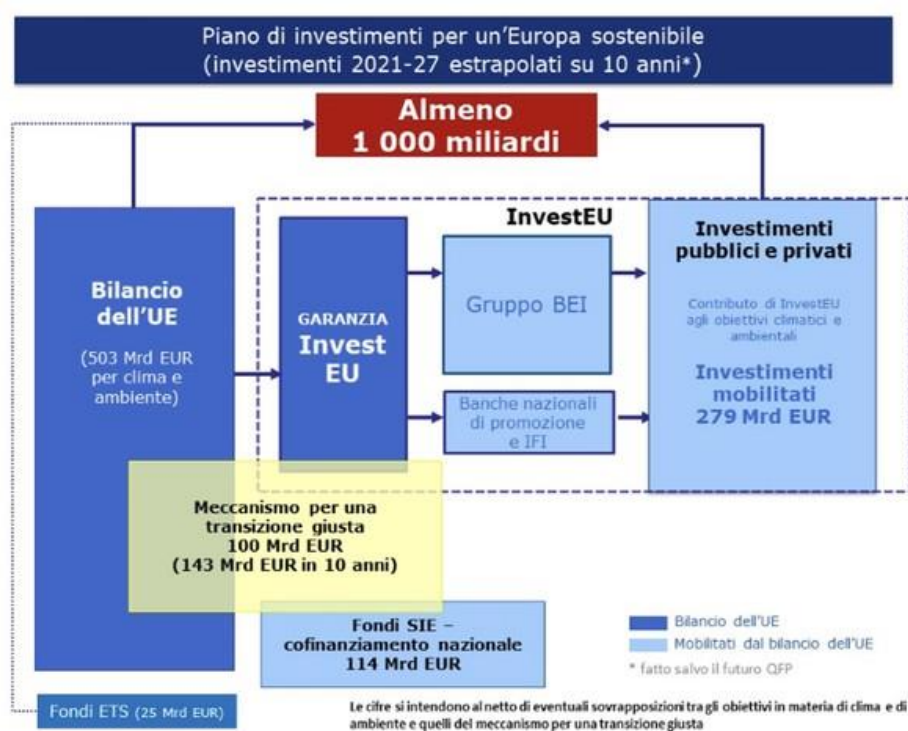
Gli incentivi sono strumenti fondamentali per accelerare la transizione energetica verso un futuro più sostenibile e resiliente dal punto di vista energetico e ambientale. Attraverso investimenti mirati, agevolazioni fiscali, sostegno alla ricerca e all'innovazione, è possibile promuovere l'adozione di tecnologie energetiche pulite, creare posti di lavoro verdi e ridurre l'impatto ambientale delle attività umane. La collaborazione tra governi, istituzioni finanziarie, settore privato e società civile è essenziale per garantire una transizione energetica di successo.

5.5.1 Il piano di investimenti per un'Europa sostenibile

Attraverso la Comunicazione del 14 gennaio 2020, “Piano di investimenti per un'Europa sostenibile — Piano di investimenti del Green Deal europeo” l'Europa si dedica in particolar modo al sostegno delle regioni e dei settori maggiormente dipendenti dai combustibili fossili e quindi più esposti alle ripercussioni della transizione. A tal proposito venne ufficializzato un meccanismo per una transizione “giusta” costituito da tre strumenti fondamentali:

- un fondo per una transizione giusta (JTF)¹⁶,
- un regime specifico per una transizione giusta nell'ambito di InvestEU,
- uno strumento di prestito per il settore pubblico volto a mobilitare ulteriori investimenti a favore delle regioni interessate e a sostenere gli investimenti realizzati dagli enti del settore pubblico.

Figura 36: Le fonti di finanziamento che permetteranno di raggiungere, nel prossimo decennio 7, almeno il livello di 1 000 miliardi di EUR nel quadro del piano di investimenti per un'Europa sostenibile



Fonte: Commissione europea “Piano di investimenti per un'Europa sostenibile”

Il piano di investimenti per un'Europa sostenibile, adottato il 14 aprile 2020, rappresenta un pilastro fondamentale del Green Deal europeo, mirando a favorire una transizione verso un'economia verde e climaticamente neutra. Questo documento complesso si focalizza sul sistema degli investimenti pubblici e privati, identificando dove e come l'Unione Europea può intervenire per sostenere gli investimenti nell'ambito dell'economia verde, al fine di raggiungere gli obiettivi del Green Deal.

¹⁶ L'UE ha introdotto un meccanismo per una transizione giusta al fine di fornire sostegno finanziario e assistenza tecnica alle regioni più colpite dalla transizione verso un'economia a basse emissioni di CO₂. [25]

I punti cardini del provvedimento sono:

1. Garantire adeguate garanzie per attrarre fondi e sostenere investimenti pubblici nelle regioni più colpite dalla transizione. Questo aspetto mira a proteggere e sostenere le regioni vulnerabili durante il processo di transizione verso l'economia verde.
2. Creare un quadro favorevole per gli investitori privati e il settore pubblico. È essenziale fornire strumenti adeguati agli istituti finanziari e agli investitori privati per identificare e sostenere investimenti sostenibili. La tassonomia dell'UE, l'efficienza energetica e le verifiche sulla sostenibilità sono fondamentali per potenziare gli investimenti nel settore.
3. Offrire supporto personalizzato alle amministrazioni pubbliche e ai promotori di progetti per individuare, strutturare e realizzare progetti sostenibili. Questo contribuisce a facilitare e accelerare l'implementazione di iniziative sostenibili.

Per raggiungere gli obiettivi previsti in termini di clima ed energia entro il 2030, saranno necessari investimenti supplementari per 260 miliardi di euro l'anno, principalmente nel settore dell'energia, dell'edilizia e dei trasporti. Il piano di investimenti mobiliterà almeno 1.000 miliardi di euro di investimenti sostenibili nel prossimo decennio, utilizzando le voci di spesa del bilancio a lungo termine dell'UE, compresa una parte destinata agli obiettivi climatici.

Ciononostante i finanziamenti e gli investimenti previsti dal piano per un'Europa sostenibile non saranno sufficienti da soli a coprire tutti i costi necessari. Sarà essenziale coinvolgere anche i bilanci nazionali e il settore privato in modo significativo, offrendo le giuste garanzie. Il piano d'azione per finanziare la crescita sostenibile, proposto nel marzo 2018, crea presupposti importanti per promuovere quadri favorevoli alla mobilitazione di finanziamenti per investimenti sostenibili. Una combinazione di norme e incentivi sarà utilizzata per affrontare le esternalità e applicare il principio "chi inquina paga", in modo che i costi per la società siano riflessi nelle decisioni di investimento.

Anche la partecipazione di tutti gli *stakeholders* sarà fondamentale per il successo del piano di investimenti per un'Europa sostenibile nel raggiungimento degli obiettivi del Green Deal. Gli investitori, le banche, gli istituti di promozione e i fondi di *private equity* sono invitati a sfruttare appieno il quadro per gli investimenti, mentre le autorità degli Stati membri dovranno svolgere un ruolo attivo nell'individuazione, promozione e, se necessario, nel cofinanziamento di questi investimenti.

5.5.2 NextGenerationEU e Piano Nazionale per la Ripresa e la Resilienza

NextGenerationEU (NGEU) rappresenta un poderoso strumento temporaneo volto a stimolare la ripresa dell'Europa dopo la pandemia. È considerato il più ingente pacchetto di misure di stimolo mai finanziato nel vecchio continente e ha l'obiettivo di favorire lo sviluppo di un'Europa più ecologica, digitale e resiliente, capitalizzando sul periodo particolare che stiamo attraversando.

Il pacchetto finanziario complessivo stanziato per la ripresa è stato varato dal Consiglio europeo nel luglio 2020 e prevede 2.018 miliardi di euro [26], dei quali:

- 1.211 miliardi provengono dal quadro finanziario pluriennale (QFP 2021-2027)
- 806,9 miliardi dal fondo NextGenerationEU.

Il pacchetto di NextGenerationEU dedicherà oltre il 50% dell'importo alla modernizzazione, puntando sui seguenti diversi ambiti cruciali:

- Ricerca e innovazione attraverso il programma “Orizzonte Europa”.
- Transizioni climatiche e digitali eque attraverso il “Fondo per una transizione giusta” e il programma “Europa digitale”.
- Preparazione, ripresa e resilienza attraverso il dispositivo per la ripresa e la resilienza, “rescEU” e un nuovo programma per la salute, “EU4Health”.
- Modernizzazione di politiche tradizionali, come la politica di coesione e la politica agricola comune, per massimizzare il loro contributo alle priorità dell'Unione.
- Lotta ai cambiamenti climatici, con il 30% dei fondi europei destinato a questo obiettivo, la percentuale più alta mai vista per il bilancio dell'UE.
- Protezione della biodiversità e promozione della parità di genere.

NextGenerationEU è suddiviso in diversi fondi, tra cui il “Dispositivo per la Crescita e la Resilienza” (*Recovery and Resilience facility*), “React-EU”, il “Fondo per una transizione giusta” (*Just Transition Fund*), “Rural Development”, “Invest-Eu”, “Horizon Europe” e “Resc-Eu”.

Per accedere ai fondi di NextGenerationEU, ogni stato ha dovuto predisporre un Piano Nazionale per la Ripresa e la Resilienza (PNRR) per il periodo 2021-2026, in linea con i criteri fissati nell'articolo 18 del Regolamento n. 2021/241/UE.

Il PNRR prevede che il 37% dei fondi sia destinato a sostenere gli obiettivi climatici e richiede che tutte le iniziative rispettino il principio del non arrecare danni significativi

all'ambiente (*Do not significant harm* - DNSH). Il dispositivo per la ripresa e la resilienza comprende la maggior parte delle risorse a titolo di NextGenerationEU, vale a dire quasi il 90% della dotazione totale.

I principi fondamentali e prioritari per la redazione dei PNRR sono stati definiti all'inizio del semestre europeo 2021, nella “Strategia annuale della Crescita sostenibile 2021” e rivisti periodicamente dalla commissione europea per far fronte alle vicende caratterizzanti il contesto storico.

La Commissione incoraggia vivamente gli Stati membri a includere nei loro piani investimenti e riforme volti a perseguire i seguenti obiettivi principali, denominati “progetti faro”:

- Utilizzare più energia pulita (*Power up*) - Utilizzare prontamente tecnologie pulite adeguate alle esigenze future e accelerare lo sviluppo e l'uso delle energie rinnovabili.
- Rinnovare (*Renovate*) - Migliorare l'efficienza energetica degli edifici pubblici e privati.
- Ricaricare e rifornire (*Recharge and Refuel*) - Promuovere tecnologie pulite adeguate alle esigenze future per accelerare l'uso di sistemi di trasporto sostenibili, accessibili e intelligenti, stazioni di ricarica e rifornimento e l'estensione dei trasporti pubblici.
- Collegare (*Connect*) - Estendere rapidamente i servizi veloci a banda larga a tutte le regioni e a tutte le famiglie, comprese le reti in fibra ottica e 5G.
- Modernizzare (*Modernise*) - Digitalizzare la pubblica amministrazione e i servizi pubblici, compresi i sistemi giudiziari e sanitari.
- Espandere (*Scale-up*) - Aumentare le capacità di cloud industriale europeo di dati e lo sviluppo dei processori più potenti, all'avanguardia e sostenibili.
- Riqualficare e migliorare le competenze (*Reskill and upskill*) - Adattare i sistemi d'istruzione per promuovere le competenze digitali e la formazione scolastica e professionale per tutte le età.

"Oggi pubblichiamo la nostra strategia di politiche economiche e sociali per l'anno successivo, dando il via al processo del semestre europeo. Durante questa crisi dovremmo continuare a sostenere i lavoratori e le imprese, pur avendo cura di preservare la

sostenibilità di bilancio a medio termine. Oggi forniamo inoltre ulteriori orientamenti agli Stati membri per preparare i loro piani di ripresa e resilienza e proponiamo sette iniziative faro per portare avanti la ripresa verde e digitale e investire nel capitale umano. Invitiamo ora il Parlamento europeo e il Consiglio a raggiungere rapidamente l'accordo definitivo sul dispositivo per la ripresa e la resilienza, in modo che i fondi possano iniziare a fluire all'inizio del prossimo anno. In una crisi, il fattore tempo è essenziale."¹⁷

5.5.3 il piano REPowerEU

Il Piano REPowerEU è una parte essenziale del Dispositivo per la ripresa e la resilienza (RRF), che è stato approvato tramite regolamento RRF il 12 febbraio 2021. L'obiettivo principale dell'UE con questo dispositivo era sostenere la pianificazione e il finanziamento coordinato delle infrastrutture sia transfrontaliere che nazionali, così come i progetti e le riforme nel settore dell'energia, in risposta agli effetti della pandemia da Covid-19. Successivamente è stato presentato il 18 maggio 2022 come risposta alle difficoltà e alle perturbazioni causate dalle tensioni nel mercato mondiale dell'energia, dovute anche all'invasione russa dell'Ucraina. Questo piano mira a trasformare progressivamente il sistema energetico europeo nel suo complesso, a «porre fine alla dipendenza dell'Unione europea dai combustibili fossili della Russia [...] e ad affrontare la crisi climatica»¹⁸.

Per raggiungere i suoi obiettivi, il Piano Repower EU prevede di apportare modifiche specifiche ai Piani per la ripresa e la resilienza (PRR) degli Stati membri. Queste modifiche includono l'integrazione di capitoli dedicati a REPowerEU.

Il Piano Repower EU si concentra su tre obiettivi principali:

1. Risparmio dell'energia: l'obiettivo è ridurre il consumo energetico attraverso l'implementazione di misure che promuovano l'efficienza energetica.
2. Produzione di energia pulita: il piano mira ad aumentare la produzione di energia da fonti rinnovabili, riducendo così l'impatto ambientale delle attività energetiche.
3. Diversificazione delle forniture energetiche: si punta a ridurre la dipendenza da fonti di approvvigionamento energetico particolarmente vulnerabili e a promuovere la diversificazione delle fonti di energia.

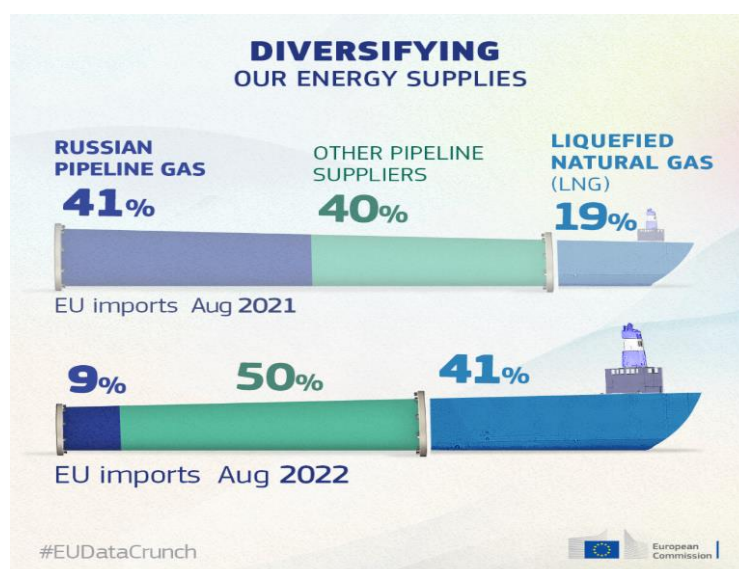
¹⁷ Dichiarazione di Valdis Dombrovskis, Vicepresidente esecutivo per Un'economia al servizio delle persone.

¹⁸ Comunicato stampa, [REPowerEU: un piano per ridurre rapidamente la dipendenza dai combustibili fossili russi e accelerare la transizione verde](#), su Commissione europea, Bruxelles, 18 maggio 2022.

Per raggiungere questi obiettivi, il piano propone una serie di misure a breve termine e altre azioni da implementare nel medio e lungo termine. Lo scopo è far evolvere il sistema energetico europeo attuale rendendolo più resiliente, sostenibile e adattabile alle sfide future. Mentre le principali azioni intraprese congiuntamente dall'UE per superare la crisi sono state:

- Diversificare l'approvvigionamento energetico: per ridurre le dipendenze dalla Russia¹⁹ per la fornitura di gas (e quindi per non finanziare il paese invasore), l'UE ha siglato accordi con altri paesi terzi per gasdotti, ha incrementato gli investimenti in gas naturale liquefatto (GNL) e ha stretto partenariati strategici per l'idrogeno rinnovabile con Namibia, Egitto e Kazakistan. Inoltre, sono stati firmati accordi per l'esportazione di gas naturale in Europa con Egitto e Israele.

Figura 37: Diversificazione approvvigionamento energetico UE



Fonte: Commissione europea, 2023

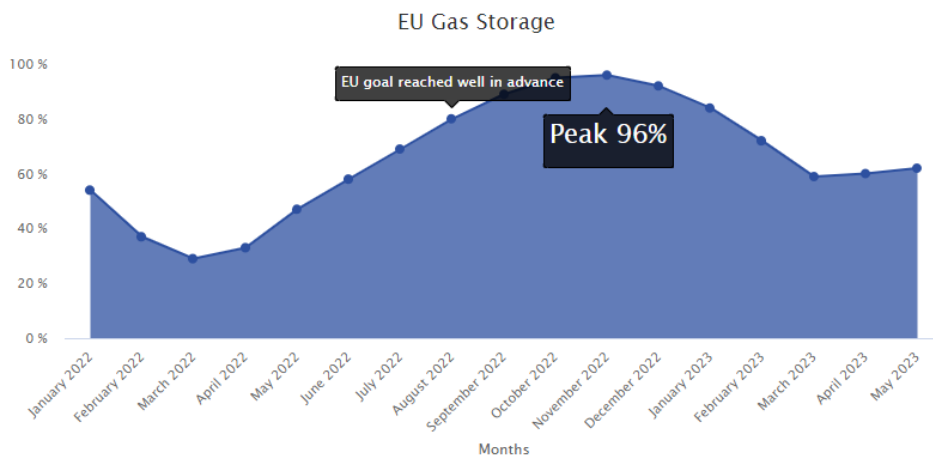
- Garantire forniture energetiche a prezzi accessibili: nell'aprile 2022 è stata introdotta la “piattaforma energetica dell'UE”, la quale ha svolto un ruolo cruciale nell'aiutare a diversificare l'approvvigionamento energetico per tutto il 2022 e nel coordinare l'azione e i negoziati dell'UE con i fornitori di gas esterni per impedire ai paesi dell'UE di superarsi a vicenda. La piattaforma sfrutta il peso del mercato unico della

¹⁹ Dal settembre 2022, il gas russo rappresenta solo l'8% di tutto il gas dei gasdotti importato nell'UE, rispetto al 41% delle importazioni dell'UE dalla Russia nell'agosto 2021.

Comunità Europea per ottenere condizioni migliori per tutti i consumatori dell'UE. A seguito dell'invasione Russa su vasta scala dell'Ucraina, l'UE ha proposto l'approvvigionamento comune di gas per garantire che gli europei avessero accesso a energia a prezzi sostenibili ed evitare qualsiasi interruzione dell'approvvigionamento energetico. Questo sistema ci ha permesso di iniziare ad acquistare congiuntamente una quota del fabbisogno di gas, come europei, e non competere tra di noi vista la scarsità delle forniture.

- Nuove regole per lo stoccaggio del gas: per evitare blackout e carenze di energia elettrica, i paesi dell'UE hanno concordato di riempire i depositi di gas prima dell'inverno. L'obiettivo prevedeva di riempire gli stoccaggi sotterranei di gas almeno all'80% della capacità entro il 1° novembre 2022.²⁰ Per i prossimi inverni, l'obiettivo sarà portare gli stoccaggi almeno al 90% della capacità entro il 1° novembre di ogni anno.

Figura 38: Riempimento stoccaggi gas Paesi UE



Fonte: Commissione europea, 2023 21

- Risparmiare energia: gli Stati membri hanno accettato le proposte della Commissione volte a ridurre volontariamente il consumo di gas in tutta l'UE

²⁰ Grazie all'ottimo lavoro di squadra, i paesi dell'UE hanno superato questo limite, raggiungendo invece il 95% dello stoccaggio di gas.

²¹https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repower-eu-affordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en#investing-in-renewables

del 15%, raggiungendo a consuntivo un target del 18% nell'inverno 2022-2023.

- Intervenire sui prezzi del gas: i paesi dell'UE hanno concordato un meccanismo di correzione del mercato che limiterà gli episodi di prezzi del gas straordinariamente elevati nell'UE e ridurrà quindi l'impatto degli aumenti dei prezzi sui cittadini e sull'economia. Un massimale di prezzo per le transazioni di gas sarà applicato quando e se i prezzi del gas raggiungeranno livelli eccezionali. L'agosto 2022 ha visto un picco senza precedenti dei prezzi del gas nell'UE, con un aumento del 1000% rispetto ai prezzi dei decenni precedenti.²²

Figura 39: Andamento prezzo del gas nell'UE



Fonte: Commissione europea, 2023 ²³

- Investire nelle rinnovabili: sono stati stanziati forti incentivi per accelerare la transizione verde e promuovere investimenti nelle energie rinnovabili.

Il piano REPowerEU ha richiesto massicci investimenti e riforme. Sono stati mobilitati quasi 300 miliardi di euro, dei quali circa 72 miliardi in sovvenzioni e circa 225 miliardi di euro in prestiti. Il Recovery and Resilience Facility (RRF) è al centro di questo

²² Negli ultimi dieci anni il prezzo medio del gas è stato compreso tra 5 €/MWh e 35 €/MWh. Nell'agosto 2022, i prezzi mensili e giornalieri TTF hanno raggiunto il massimo storico di oltre 300 €/MWh. I livelli di prezzo più elevati sono stati raggiunti in cinque giorni di negoziazione consecutivi dal 22 al 26 agosto 2022, quando erano superiori a 265 €/MWh.

²³<https://www.consilium.europa.eu/en/infographics/a-market-mechanism-to-limit-excessive-gas-price-spikes/>

finanziamento. Sono inclusi circa 10 miliardi di euro in collegamenti mancanti per gas e GNL in modo che nessuno Stato membro sia lasciato al freddo, e fino a 2 miliardi di euro per le infrastrutture petrolifere per porre fine alle importazioni di petrolio russo. Il resto del finanziamento (95% di esso) andrà ad accelerare e potenziare la transizione verso l'energia pulita.²⁴

²⁴ Altre fonti di finanziamento previste per il REPowerEU sono: fondi della politica di coesione, fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale, meccanismo per collegare l'Europa, fondo per l'innovazione, finanziamenti nazionali e comunitari a sostegno degli obiettivi di REPowerEU, misure fiscali nazionali, investimento privato, la Banca europea per gli investimenti.

Capitolo 6

NEUTRALITÀ CARBONICA 2050

6.1 Introduzione

Oggi il mondo si trova nuovamente di fronte a un momento di tensioni geopolitiche elevate e incertezza nel settore dell'energia, a 50 anni dallo shock petrolifero, evento che portò alla fondazione dell'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA), alla quale è stato affidato un ruolo cruciale da svolgere: *“leading the global energy sector’s fight against climate change”*²⁵, ovvero “guidare la lotta globale al cambiamento climatico. [27]

Come negli anni '70, oggi, l'attenzione è rivolta alle forniture di combustibili fossili causate da una crisi in Medio Oriente, nonostante il sistema energetico globale sia cambiato considerevolmente dai primi anni '70 e ulteriori cambiamenti stiano avvenendo rapidamente sotto i nostri occhi.

A differenza del passato, già disponiamo delle tecnologie per l'energia pulita necessarie per il raggiungere gran parte degli obiettivi prefissati. Lo shock petrolifero del 1973 è stato un catalizzatore importante per il cambiamento, guidando un grande impulso per aumentare l'efficienza energetica e l'energia nucleare. Ci sono voluti molti anni per implementarli, mentre altre tecnologie chiave, come eolico e fotovoltaico erano ancora in fase di sviluppo. Oggi tali tecnologie sono ben consolidate e facilmente disponibili e rappresentano soluzioni durature e abbastanza performanti per i dilemmi energetici odierni. [28]

La diffusione dell'energia pulita sta procedendo più rapidamente di quanto molte persone si rendano conto. Ciononostante, può, e dovrebbe, procedere ancora più velocemente affinché possiamo raggiungere gli obiettivi prefissati in materia di energia e clima, facendo leva sulla responsabilità collettiva.

Inoltre, oggi abbiamo processi internazionali e accordi in atto, come l'Accordo di Parigi, che forniscono un quadro importante circa le azioni più incisive da attuare da parte dei governi.

²⁵ Compito assegnato durante l'“*International Energy Agency’s 2022 Ministerial Meeting*” tenutosi a Parigi nel 2022 [27].

6.2 Gli scenari climatici e le ipotesi

Nel corso degli anni diverse organizzazioni hanno sviluppato numerosi scenari climatici al fine di ipotizzare la futura evoluzione delle emissioni di gas a effetto serra. Tra i più utilizzati vi sono gli scenari climatici pubblicati dal *Network for Greening the Financial System* (NGFS) e quelli elaborati dall'Agenzia Internazionale dell'Energia (IEA). Gli scenari NGFS sono utilizzati in particolare dalle banche centrali e dalle banche di investimento per sottoporre a stress test i propri portafogli. Sviluppano diversi gruppi di scenari che descrivono una gamma di futuri potenziali.

L'IEA, invece, pubblica diversi scenari climatici come parte del suo *World Energy Outlook* annuale, utilizzati da una grande quantità di aziende, di investitori e istituzioni. Gli scenari IEA variano in termini di ambizione e di rigore dallo scenario “*business as usual*” partendo da una valutazione settoriale delle politiche dei governi di tutto il mondo. Gli scenari forniti da NGFS e IEA possono parzialmente sovrapporsi l'un l'altro, ma gli investitori che intraprendono un'analisi degli scenari climatici sceglieranno un gruppo di scenari piuttosto che un altro, in base alle esigenze specifiche (finanziarie o meno). Al fine del presente lavoro, saranno utilizzati prettamente le pubblicazioni dell'Agenzia Internazionale dell'Energia.

6.3 Gli scenari IEA

“La transizione verso l'energia pulita sta avvenendo in tutto il mondo ed è inarrestabile. Non è più una questione di ‘se’, ma solo di ‘quando’. E prima è, meglio è per tutti noi”.

Con queste parole Fatih Birol, direttore esecutivo dell'Agenzia Internazionale dell'Energia, ha presentato il nuovo *World Energy Outlook 2023* della IEA (WEO-2023), un'analisi puntuale e approfondita su ogni aspetto del sistema energetico globale. [29]

Ogni anno il *World Energy Outlook* dell'International Energy Agency (IEA) fornisce analisi critiche e approfondimenti sulle tendenze della domanda e dell'offerta di energia e su ciò che significano per la sicurezza energetica, la protezione ambientale e lo sviluppo economico.

Il rapporto pubblicato utilizza tre scenari principali per esplorare diversi percorsi per il settore energetico fino al 2050. Ciascuno è completamente aggiornato per includere i più recenti dati disponibili sul mercato energetico, sui costi e risponde in modo diverso ai fattori economici e demografici, fondamentali della crescente domanda di servizi energetici. Queste differenze riflettono in gran parte le varie scelte politiche che si presume vengano fatte dai

governi che, a loro volta, modellano le decisioni di investimento e le modalità con cui le famiglie e le aziende soddisfano i loro bisogni energetici.

Le proiezioni derivano dal modello *Global Energy and Climate* (GEC), che è un quadro di modellizzazione su larga scala sviluppato presso l'Agencia Internazionale per l'Energia (IEA). Il modello abbina la domanda e l'offerta di energia in più paesi e regioni, tenendo conto di una gamma molto ampia di combustibili e tecnologie energetiche, comprendendo non solo quelli ampiamente utilizzati oggi, ma anche quelli che si ritiene si stiano avvicinando alla commercializzazione (quindi già disponibili). Il modello GEC è un modello di simulazione che riflette l'interazione nel mondo reale tra politiche, costi e scelte di investimento e che fornisce informazioni su come i cambiamenti in un'area possono influenzare altri. Gli scenari esposti non possono essere considerati delle previsioni e non vogliono guidare il lettore verso un'unica visione del futuro. L'obiettivo è promuovere una comprensione più profonda del modo in cui diverse leve producono risultati diversi, con implicazioni diverse in tema di sicurezza e sostenibilità del sistema energetico. Un elemento importante di questa prospettiva è che tutti gli scenari ora tengono conto non solo delle politiche energetiche e climatiche, ma anche delle strategie industriali che influenzano la velocità con cui le diverse tecnologie potrebbero entrare nel mix. Ciò significa che la portata e l'ubicazione della capacità produttiva per vari componenti del sistema energetico pulito sono diventate variabili importanti nella costruzione e nella progettazione degli scenari.

Gli scenari esposti nelle ultime versioni WEO sono:

- **Scenario degli Impegni Annunciati (*Announced Pledges Scenario* - APS):** presuppone che i governi rispettino, integralmente e per tempo, tutti gli impegni relativi al clima annunciati, compresi gli obiettivi a lungo termine come le emissioni nette pari a zero e gli impegni nei "Contributi Determinati a livello Nazionale"²⁶ (*Nationally Determined Contributions* - NDCs), nonché impegni in ambiti altrettanto sensibili, come l'accesso all'energia. Vengono considerati anche gli impegni assunti dalle imprese e da altre parti interessate laddove si aggiungono alle ambizioni stabilite dai governi. Si presume che i Paesi senza impegni ambiziosi, a lungo termine, trarranno vantaggio da questo scenario dalle riduzioni accelerate dei costi

²⁶ Si tratta degli obiettivi climatici che le Nazioni si sono date, in maniera autonoma e volontaria, per contribuire a mantenere la crescita della temperatura globale entro i 2 gradi Celsius. [72]

che esso produce per una serie di tecnologie energetiche pulite. L'APS è associato ad un aumento della temperatura di 1,7 °C nel 2100 (con una probabilità del 50%).

- **Scenario delle politiche dichiarate (*Stated Policies Scenario - STEPS*):** progettato per fornire un'idea della direzione della progressione del sistema energetico, fornisce come *output* una revisione dettagliata, settore per settore, delle politiche e delle misure effettivamente in atto. Non presuppone automaticamente che gli obiettivi energetici o climatici prefissati siano raggiunti, ma esamina in dettaglio ciò che stanno effettivamente facendo per raggiungere i loro traguardi e obiettivi nell'economia energetica. Allo STEPS, attualmente, è associato un aumento della temperatura di 2,4 °C nel 2100 (con una probabilità del 50%).
- **Scenario Emissioni nette zero entro il 2050 (*Net Zero Emissions by 2050 - NZE*):** descrive un percorso per il settore energetico volto a limitare l'aumento della temperatura globale a 1,5 °C rispetto ai livelli preindustriali nel 2050, con almeno una probabilità del 50%. Soddisfa anche i principali Obiettivi di Sviluppo Sostenibile²⁷ (*OSS o Sustainable Development Goals - SDG*) delle Nazioni Unite legati all'energia, ipotizzando che l'accesso universale ai servizi energetici moderni sarà raggiunto entro il 2030 e saranno garantiti importanti miglioramenti nella qualità dell'aria.

Ogni scenario è stato sviluppato tenendo conto di criteri qualitativi, rendendo più facile capire come e perché si verificano i cambiamenti e interpretandone i risultati. Attualmente considerano solo le emissioni di CO_2 legate ai sistemi energetici, escludendo quindi l'uso del suolo e altri gas serra. [30]

6.3.1 Le ipotesi alla base dei modelli

Tutti gli sviluppi elaborati, precedentemente esposti, suppongono le seguenti ipotesi economiche e demografiche:

²⁷ Sono gli elementi essenziali dell'Agenda 2030, i cui 17 obiettivi di sviluppo sostenibile con i relativi 169 sotto-obiettivi approvati, mirano a porre fine alla povertà, a lottare contro l'ineguaglianza e allo sviluppo sociale ed economico, senza trascurare i cambiamenti climatici e la costruzione società pacifiche entro l'anno 2030. [73]

- L'economia globale cresce con un ritmo pari al 3% annuo fino al 2050 (valore medio, poiché esistono grandi differenze tra i Paesi dovute maggiormente alle rispettive economie e, soprattutto, all'esposizione e alla resilienza agli shock, nonché al differente potenziale di crescita di ciascuna area geografica). Nel primo periodo è prevista un'enfasi maggiore dovuta alla ripresa di alcuni servizi, come il turismo ad esempio, fortemente rallentati dalla pandemia. Non è stato trascurato il rischio della stagflazione²⁸, legato al continuo aumento dei tassi di interesse nel decennio 2020 – 2030.

Figura 40: Crescita media PIL per Regioni

	Compound average annual growth rate			
	2010-2021	2021-2030	2030-2050	2021-2050
North America	1.9%	2.0%	2.0%	2.0%
United States	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
Central and South America	0.9%	2.4%	2.4%	2.4%
Brazil	0.7%	1.8%	2.5%	2.3%
Europe	1.6%	2.0%	1.4%	1.6%
European Union	1.2%	1.9%	1.2%	1.4%
Africa	2.7%	4.1%	4.2%	4.1%
South Africa	1.1%	1.6%	2.8%	2.4%
Middle East	2.0%	3.2%	3.2%	3.2%
Eurasia	2.1%	0.1%	1.4%	1.0%
Russia	1.7%	-1.1%	0.7%	0.1%
Asia Pacific	4.9%	4.7%	3.1%	3.6%
China	6.8%	4.7%	2.8%	3.4%
India	5.5%	7.2%	4.4%	5.2%
Japan	0.5%	0.9%	0.6%	0.7%
Southeast Asia	4.1%	5.0%	3.3%	3.8%
World	2.9%	3.3%	2.6%	2.8%

Note: Calculated based on GDP expressed in year-2021 US dollars in purchasing power parity terms.

Sources: IEA analysis based on Oxford Economics (2022) and IMF (2022).

Fonte: Analisi IEA basate su Oxford Economics (2022) e IMF (2022)

- La popolazione globale aumenterà da 8 Mld di persone (valore del 2022 [31]) a 8,5 Mld nel 2030 e 9,7 Mld nel 2050 spinti dall'allungamento della vita medio e dall'elevato tasso di fertilità dei paesi in via di sviluppo. Ciò comporta un aumento notevole di coloro che necessiteranno di servizi energetici (circa 17,5%), nonostante la riduzione annua del tasso di crescita della popolazione (1% nel 2020 e 0,5%

²⁸ Concetto che delinea uno scenario economico in cui sono compresenti forte e persistente inflazione, stagflazione economica e, come conseguenza di quest'ultima, tasso di disoccupazione alto. [71]

previsto nel 2050). I fattori demografici incidono particolarmente nel panorama dei consumi energetici, infatti, ad esempio, l'aumento dell'aspettativa di vita che porta ad avere un numero sempre maggiore di anziani, quindi maggiori utilizzatori di energia domestica ma minore energia relativa ai trasporti.

- I prezzi dell'energia, dei minerali e del carbone seguono una traiettoria regolare, in diminuzione, modellata da un sistema energetico in equilibrio tra domanda e offerta, spinti dagli investimenti, dalle tecnologie e dalle politiche.

Figura 41: Prezzi dei combustibili fossili per scenario

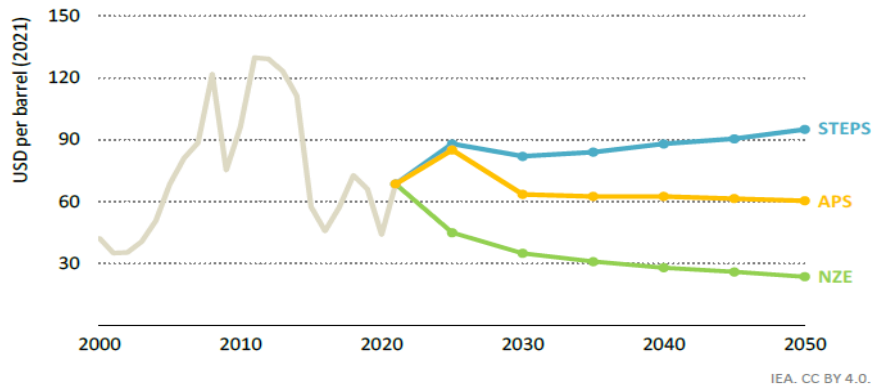
Real terms (USD 2021)	2010	2021	Net Zero Emissions by 2050		Announced Pledges		Stated Policies	
			2030	2050	2030	2050	2030	2050
IEA crude oil (USD/barrel)	96	69	35	24	64	60	82	95
Natural gas (USD/MBtu)								
United States	5.3	3.9	1.9	1.8	3.7	2.6	4.0	4.7
European Union	9.0	9.5	4.6	3.8	7.9	6.3	8.5	9.2
China	8.0	10.1	6.1	5.1	8.8	7.4	9.8	10.2
Japan	13.3	10.2	6.0	5.1	9.1	7.4	10.9	10.6
Steam coal (USD/tonne)								
United States	63	44	22	17	42	24	46	44
European Union	113	120	52	42	62	53	60	64
Japan	132	153	59	46	74	59	91	72
Coastal China	142	164	58	48	73	62	89	74

Notes: MBtu = million British thermal units. The IEA crude oil price is a weighted average import price among IEA member countries. Natural gas prices are weighted averages expressed on a gross calorific-value basis. The US natural gas price reflects the wholesale price prevailing on the domestic market. The European Union and China natural gas prices reflect a balance of pipeline and LNG imports, while the Japan gas price solely reflects LNG imports. The LNG prices used are those at the customs border, prior to regasification. Steam coal prices are weighted averages adjusted to 6 000 kilocalories per kilogramme. The US steam coal price reflects mine mouth prices plus transport and handling costs. Coastal China steam coal price reflects a balance of imports and domestic sales, while the European Union and Japanese steam coal prices are solely for imports.

Fonte: Analisi IEA

- Il mercato del petrolio torna in equilibrio dopo aver assorbito lo shock dovuto al conflitto in Ucraina, riducendo la sua volatilità, ma con differenze sostanziali tra i vari scenari, dovuti ai diversi equilibri tra domanda e offerta previsti.

Figura 42: Prezzo medio importazioni di petrolio per scenario



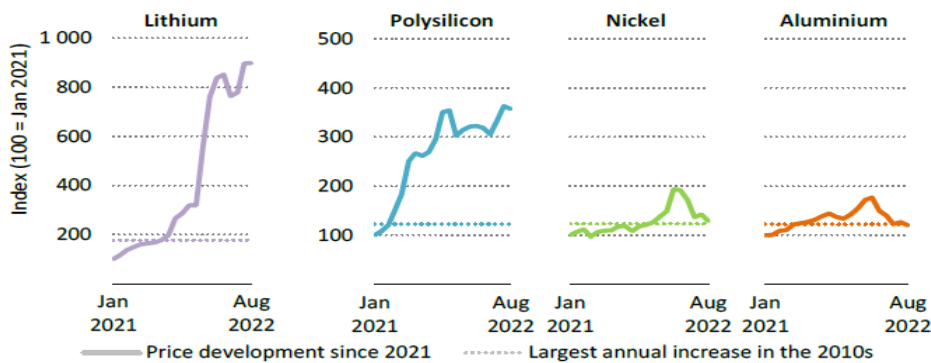
Equilibrium oil prices vary substantially by scenario, reflecting the way that policies, costs and resources affect the supply-demand balance

Note: STEPS = Stated Policies Scenario; APS = Announced Pledges Scenario; NZE = Net Zero Emissions by 2050 Scenario.

Fonte: Analisi IEA

- Per i prezzi dei minerali critici, diversamente dai combustibili, non sono state ipotizzate curve di equilibrio di mercato vista la forte incertezza sull'entità degli investimenti previsti, nonostante i notevoli incrementi registrati negli ultimi anni. Senza ulteriori aumenti degli investimenti in nuove forniture, congiuntamente agli sforzi per migliorare l'efficienza dei materiali e alla ricerca per sostituire i metalli con nuovi minerali, si rischia di avere in futuro prezzi più alti, con elevate volatilità, che potrebbero ostacolare la transizione. Pertanto sono stati utilizzati i prezzi medi del 2021 come assunzione di base per il calcolo dei futuri ricavi.

Figura 43: Previsione dei prezzi dei minerali critici e dei metalli



Prices for important energy transition minerals and metals have been on a rapid upward march since the start of 2021, although price rises moderated in second-half 2022

Note: Assessment based on Lithium Carbonate Global Average, London Metal Exchange (LME) Cobalt Cash, LME Nickel Cash and LME Aluminium 99.7% Cash prices.

Sources: S&P Global (2022); BNEF (2022) for polysilicon prices.

Fonte: S&P Global (2022) e BNEF (2022)

- I prezzi del carbonio, in tutti gli scenari presentati, non rappresentano i costi marginali di abbattimento della CO_2 . Ogni scenario ha un diverso prezzo, poiché variano le politiche energetiche e le misure di contenimento incluse.
- Non sono previste importanti svolte tecnologiche nel WEO, ma è integrato un processo di miglioramento continuo e di apprendimento tecnologico favorito anche dall'aumento dell'efficienza e dalle economie di scala. [28]

6.4 La roadmap per le zero emissioni del settore energetico: Lo scenario NZE

Lo scenario NZE è normativo, diversamente dagli altri 2 precedentemente citati che sono esplorativi, poiché è stato progettato per raggiungere l'obiettivo dichiarato e mostra un percorso sostenibile per raggiungerlo, anche se impegnativo.

Il primo storico rapporto dell'IEA è stato pubblicato nel 2021, "Net Zero entro il 2050": una tabella di marcia per il settore energetico globale. Da allora, il settore energetico ha visto notevoli cambiamenti che hanno portato a successive revisioni basate sulle recenti svolte in ambito tecnologico, dei mercati e delle politiche internazionali. L'ultimo aggiornamento è stato pubblicato a settembre 2023 [32], e indica, come le precedenti versioni, un percorso, ma non l'unico, affinché il settore energetico raggiunga zero emissioni nette di CO_2 entro il 2050 e faccia la sua parte, come principale fonte di emissioni di gas serra, nel raggiungimento dell'obiettivo di 1,5°C.

Confrontando le varie versioni pubblicate dell'Outlook, è evidente come ogni anno che passa sia caratterizzato da emissioni elevate e progressi limitati verso gli SDG, rendendo più difficile il raggiungimento degli obiettivi dello scenario NZE. Ciononostante, sulla base dell'ultimo elaborato pubblicato, la recente accelerazione nelle transizioni verso l'energia pulita rappresenta ancora una strada percorribile per raggiungere gli obiettivi.

La necessità di trasformare il sistema energetico globale rendendolo predisposto al raggiungimento dell'obiettivo di 1,5 ° C non è mai stata così forte. I cambiamenti climatici sono sempre più evidenti e gravi, basti pensare che agosto 2023 è stato di gran lunga il mese più caldo mai registrato.

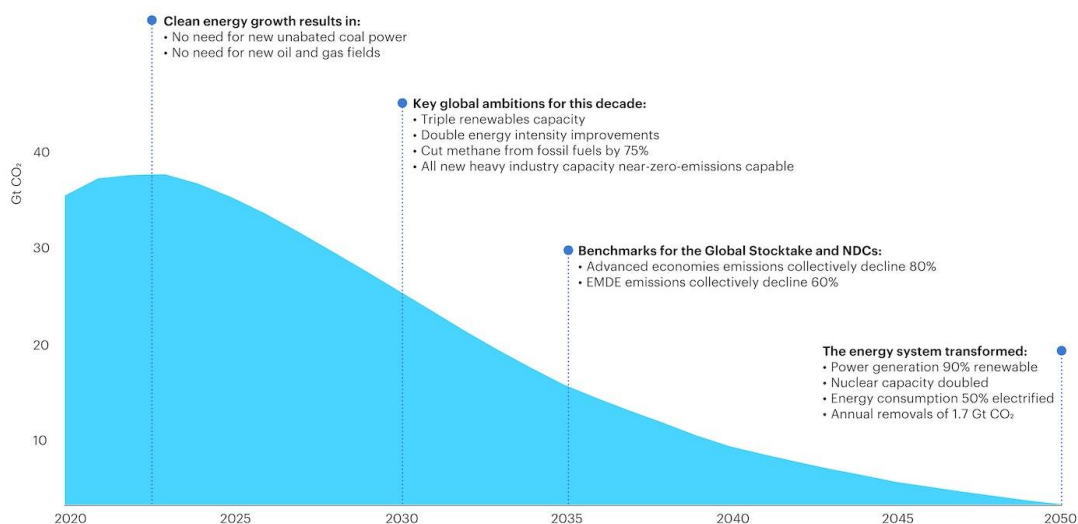
Anche le emissioni globali di anidride carbonica (CO_2) provenienti dal settore energetico hanno raggiunto il nuovo record di 37 miliardi di tonnellate (Gt) nel 2022, l'1% in più rispetto al livello pre-pandemia, ma prossime a raggiungere il picco in questo decennio. Difatti, la velocità con cui si stanno diffondendo le principali tecnologie energetiche pulite

fa sì che l'IEA preveda, per il decennio corrente, anche il raggiungimento del picco della domanda di carbone, petrolio e gas naturale, anche in assenza di nuove politiche climatiche. Questo è incoraggiante, ma non abbastanza per raggiungere l'obiettivo di 1,5 ° C.

Gli sviluppi positivi degli ultimi due anni, che includono le installazioni solari fotovoltaiche e il monitoraggio delle vendite di auto elettriche, sono risultati in linea con i traguardi stabiliti nel rapporto 2021 “Net Zero entro il 2050” e sono stati in parte favoriti anche dalle iniziative dei governi in risposta alla pandemia e alla crisi energetica globale innescata dall'invasione russa dell'Ucraina. Difatti sono state incentivate una serie di misure progettate per promuovere l'adozione di tecnologie energetiche pulite. Se pienamente attuate, le espansioni della capacità produttiva attualmente annunciate per il solare fotovoltaico e le batterie dovrebbero essere sufficienti a soddisfare la domanda aggiuntiva di energia elettrica pulita entro il 2030, secondo l'aggiornamento dello scenario NZE.

Lo scenario NZE è un percorso globale ma differenziato: ogni paese seguirà il proprio percorso in base alle proprie risorse e circostanze. Tuttavia, tutti devono agire in modo molto più deciso di quanto non facciano oggi. Il percorso “net zero” garantisce il pieno accesso alle moderne forme di energia per tutti entro il 2030 attraverso investimenti annuali di quasi 45 miliardi di dollari l'anno – poco più dell'1% degli investimenti nel settore energetico.

Figura 44: Obiettivi per il raggiungimento della NZE



Fonte: IEA, WEO 2023

6.4.1 *Gli obiettivi raggiungibili con gli strumenti già disponibili*

L'incremento delle energie rinnovabili, il miglioramento dell'efficienza energetica, la riduzione delle emissioni di metano e l'incremento dell'elettrificazione con le tecnologie già oggi disponibili consentono di ottenere oltre l'80% delle riduzioni delle emissioni necessarie entro il 2030. È evidente che le azioni chiave necessarie per piegare drasticamente la curva delle emissioni verso il basso entro il 2030 siano state ben recepite poiché avanzano ad un ritmo abbastanza accelerato col sostegno dei governi. Ma tuttora gli sforzi non sono sufficienti.

L'incremento dell'energia pulita rappresenta il fattore principale per portare alla riduzione della domanda di combustibili fossili di oltre il 25% in questo decennio. Obiettivo raggiungibile mediante politiche chiare e mirate come, ad esempio, il pensionamento anticipato e/o la riconversione delle centrali elettriche a carbone, fondamentali per facilitare il calo della domanda di combustibili fossili e creare ulteriore spazio per l'espansione dell'energia pulita. Le attuali impostazioni politiche hanno già messo le economie avanzate e la Cina sulla buona strada per raggiungere l'85% del loro contributo a questo obiettivo globale, ma sono necessarie politiche ancora più forti e sostegno internazionale in altri mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo. Per tutti i Paesi sono fondamentali l'accelerazione delle autorizzazioni, l'estensione e la modernizzazione delle reti elettriche, la risoluzione dei colli di bottiglia della catena di approvvigionamento e l'integrazione sicura delle energie rinnovabili variabili.

La forte crescita dell'energia pulita, insieme ad altre misure politiche, portano a una riduzione delle emissioni di CO_2 del settore energetico del 35% entro il 2030 rispetto al 2022. Entro il 2030, inoltre, il modello prevede di triplicare la capacità globale installata di energie rinnovabili fino a 11.000 gigawatt, in particolare mediante il solare fotovoltaico e l'eolico, già ampiamente disponibili, ben conosciuti e spesso rapidamente implementabili oltre che economicamente vantaggiose. Entro la stessa scadenza, dovrà raddoppiare anche il tasso annuo di miglioramento dell'intensità energetica²⁹, consentendo di risparmiare l'equivalente energetico di tutto il consumo di petrolio nel trasporto stradale odierno, di ridurre le emissioni, aumentandone la sicurezza energetica e l'accessibilità economica.

²⁹ L'intensità energetica è l'indicatore dell'energia richiesta (MTEP) per unità di ricchezza prodotta (PIL). Quanto più è bassa l'intensità energetica di un paese, tanto maggiore è l'efficienza energetica del sistema produttivo ed economico.

Il mix di priorità varierà da paese a paese, ma a livello globale, i miglioramenti dell'intensità energetica deriveranno da tre azioni ugualmente importanti:

- Migliorare l'efficienza tecnica di apparecchiature come motori elettrici e condizionatori d'aria;
- Il passaggio a combustibili più efficienti e implementare soluzioni di cucina pulita nei paesi a basso reddito, se non fattibile l'elettrificazione;
- Utilizzare l'energia e i materiali in modo più efficiente.

Queste tre azioni, ritenute fondamentali, riducono la domanda di combustibili fossili, consentendo il raggiungimento di una pietra miliare fondamentale del rapporto IEA 2021: la fine "immediata" delle nuove approvazioni di impianti a carbone senza sistemi di cattura e stoccaggio di carbonio.

6.4.2 L'importanza dell'elettrificazione e della riduzione dei consumi dei combustibili fossili

Tecnologie in forte espansione come i veicoli elettrici e le pompe di calore guidano l'elettrificazione in tutto il sistema energetico, fornendo quasi un quinto delle riduzioni delle emissioni fino al 2030 nello scenario NZE. La recente crescita colloca le vendite di auto elettriche sulla buona strada per rappresentare i due terzi delle vendite di auto nuove entro il 2030. Gli obiettivi di produzione annunciati dalle case automobilistiche sottolineano che questa quota, seppur elevata, è raggiungibile. Anche le vendite di pompe di calore sono aumentate dell'11% a livello globale nel 2022 e in molti mercati, in particolare nell'Unione Europea, stanno già superando il tasso di crescita annuale di circa il 20%, considerato necessario fino al 2030 nello scenario NZE.

Ridurre le emissioni di metano dal settore energetico del 75% entro il 2030 è rappresentata come una delle opportunità a minor costo per limitare il riscaldamento globale nel breve termine. Infatti, il metano gas serra è responsabile di circa il 30% del riscaldamento globale antropogenico, secondo per importanza solo all'anidride carbonica. Dopo l'agricoltura, il settore a cui sono dovute le maggiori emissioni GHG del gas in questione è il settore dell'energia. La fonte principale sono le emissioni fuggitive, le fughe accidentali di gas che avvengono durante l'estrazione o il trasporto di gas naturale, petrolio e carbone. Tale

riduzione³⁰ costerebbe circa 75 miliardi di dollari di spesa cumulativa fino al 2030, pari ad appena il 2% del reddito netto ricevuto dall'industria del petrolio e del gas nel 2022. Inoltre gran parte dell'investimento necessario sarebbe ricavato dalla vendita del metano captato. Politiche rigorose ed efficaci nello scenario NZE stimolano la diffusione dell'energia pulita e riducono la domanda di combustibili fossili di oltre il 25% entro il 2030 e dell'80% nel 2050.

La domanda di carbone scende da circa 5.800 milioni di tonnellate equivalenti di carbone (Mtce) nel 2022 a 3.250 Mtce entro il 2030 e circa 500 Mtce entro il 2050. Il petrolio scende da circa 100 milioni di barili al giorno (mb/g) a 77 mb/g entro il 2030 e 24 mb/g entro il 2050. La domanda di gas naturale scende da 4.150 miliardi di metri cubi (bcm) nel 2022 a 3.400 bcm nel 2030 e 900 bcm nel 2050.

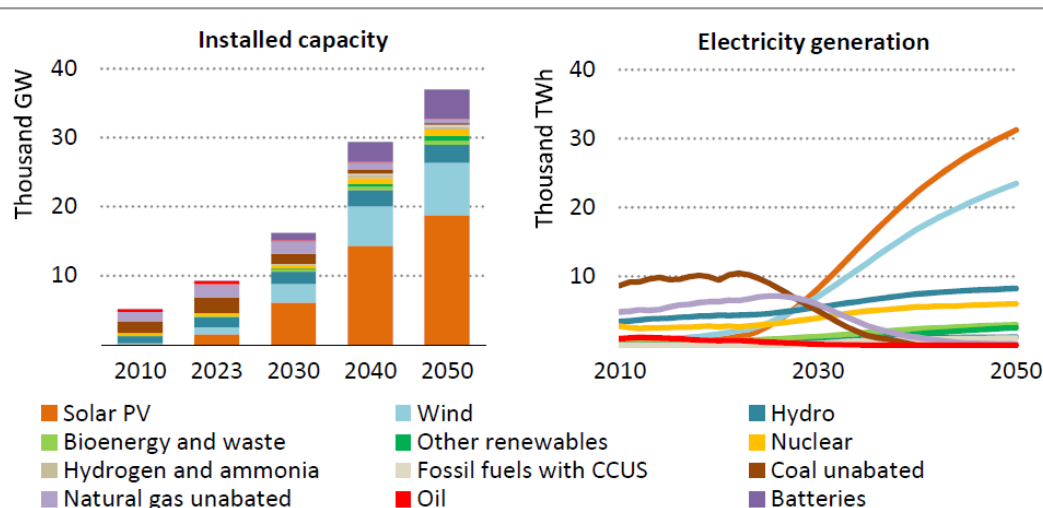
6.4.3 *La generazione di elettricità*

Il nuovo scenario NZE prevede un aumento della produzione globale di elettricità di oltre due volte e mezzo dal 2022 al 2050, con un tasso annuo di crescita del 3,5%, quindi più spedito rispetto all'ultimo decennio che ha visto una crescita annua media del 2,5%.

La quota di elettricità nei consumi finali passa dal 20% nel 2022 a quasi il 30% nel 2030, superando il 50% nel 2050. Tale crescita è guidata oltre che dalla forte elettrificazione in tutti gli ambiti e settori, anche dallo sviluppo economico e dalla crescita della popolazione.

³⁰ Implica l'utilizzo di nuove tecnologie per contenere le perdite di metano gas serra durante l'estrazione e il trasporto di combustibili fossili. [76]

Figura 45: Evoluzione capacità installata totale e produzione di energia elettrica per fonte

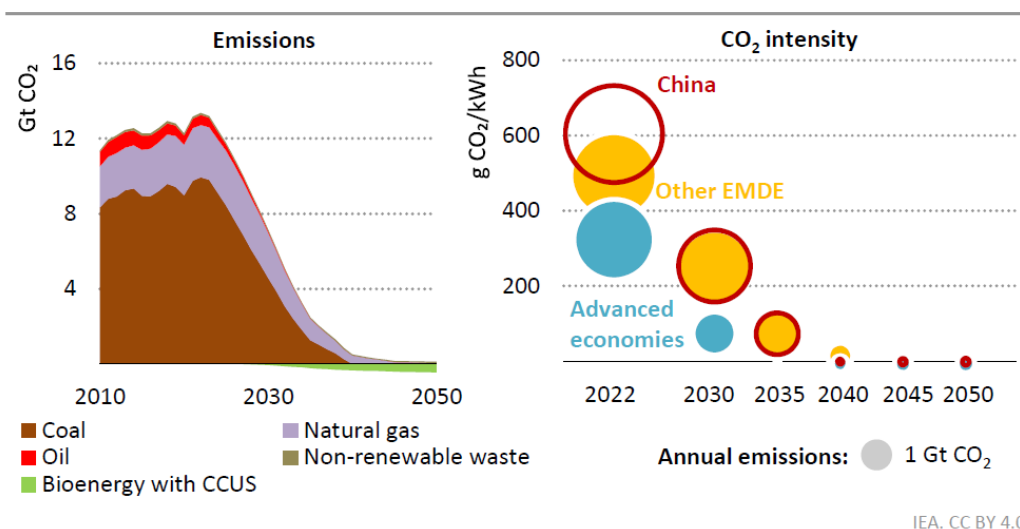


IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA, Net Zero Roadmap 2023, pag.83 (Aggiornamento 2023)

Per far fronte al crescente fabbisogno di energia elettrica pulita, tutte le fonti a basse emissioni (rinnovabili, nucleare, combustibili fossili con CCUS, idrogeno e ammoniaca) dovranno espandersi rapidamente, superando i combustibili fossili subito dopo il 2025 e raggiungendo il 71% della produzione totale entro il 2030, quasi il doppio della quota nel 2022. Seguendo questa “root”, i settori dell’elettricità nelle economie avanzate raggiungeranno le emissioni nette pari a zero entro il 2035, nel 2040 la Cina ed entro il 2045 in altri mercati emergenti ed economie in via di sviluppo. In ogni caso, l’elettricità nello scenario è il primo settore energetico a raggiungere le emissioni nette pari a zero, favorendo l’elettrificazione degli altri settori.

Figura 46: Emissioni globali del settore elettrico e intensità di CO_2 per produzione di energia elettrica



Fonte: IEA, Net Zero Roadmap 2023, pag.83 (Aggiornamento 2023)

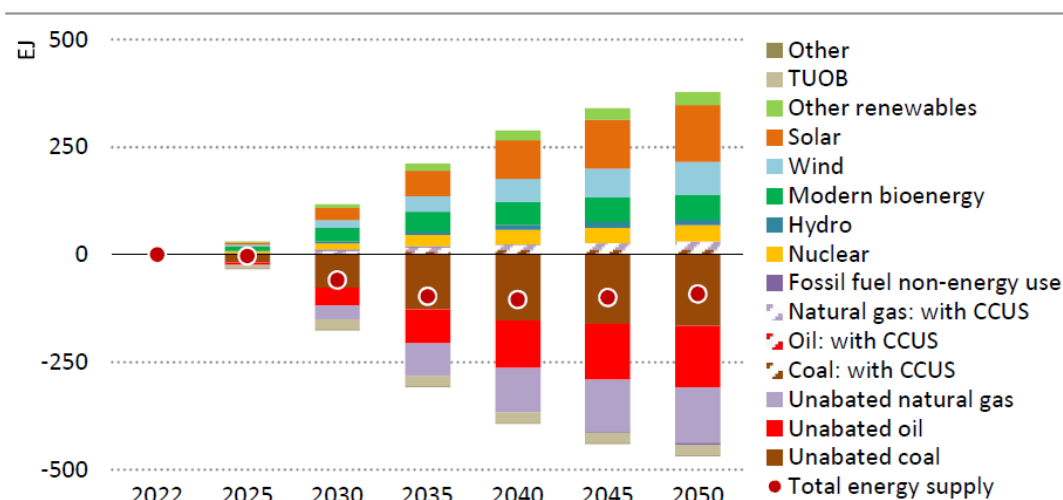
6.4.3.1 L'approvvigionamento energetico totale

Tra il 2022 e il 2030, le fonti a basse emissioni aumenteranno di oltre 110 EJ (pari alla somma dell'attuale fornitura energetica totale di Stati Uniti e Giappone). L'aumento previsto è guidato dalla moderna bioenergia nelle sue forme solida, liquida e gassosa. Anche l'eolico e il solare fotovoltaico aumentano fortemente.

Entro la fine del decennio, la domanda totale di combustibili fossili diminuirà di poco più di un quarto, ovvero 140 EJ. 75 EJ saranno dovuti alle riduzioni di utilizzo del carbone³¹, circa 26 EJ al gas naturale, riflettendo in parte il suo crescente utilizzo in combinazione con CCUS per la produzione di idrogeno, mentre i restanti 39 EJ al petrolio. Il crescente utilizzo di combustibili fossili combinato con il CCUS è di gran lunga inferiore al declino costante dei combustibili fossili (definiti "unabated" [33] nella figura successiva).

³¹ Il calo della domanda di carbone è molto inferiore rispetto a scenari comparabili valutati dall'IPCC (cfr. riquadro 2.1). La domanda di petrolio diminuisce di circa 39 EJ.

Figura 47: Cambiamenti nell'approvvigionamento energetico totale per fonte nello scenario Net Zero, 2022–2050



IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA [34]

L'offerta totale di energia (non solo elettrica) sarà inferiore di quasi il 10% (60 EJ) nel 2030 rispetto al 2022, nonostante la crescita economica globale di oltre un quarto. Ciò implica notevoli progressi nella riduzione dell'intensità energetica dall'attuale 2% annuo a oltre il 4% entro il 2030. Migliorare l'efficienza tecnica di elettrodomestici, motori e involucri edilizi è fondamentale, ma una parte sostanziale di questa accelerazione nel miglioramento dell'intensità deriva da uno spostamento verso vettori energetici più efficienti come l'elettricità.

Dopo il 2030 il modello di approvvigionamento energetico continua ad evolversi rapidamente e si trasformerà entro il 2050.

Il solare, compreso il solare termico e il solare fotovoltaico, fornirà quasi 140 EJ nel 2050, compensando l'attuale fornitura energetica totale di gas naturale senza CCUS.

La bioenergia moderna invece fornirà circa 100 EJ e l'energia eolica circa 85 EJ.

Nel complesso, le fonti rinnovabili copriranno quasi il 75% dell'approvvigionamento energetico totale entro il 2050.

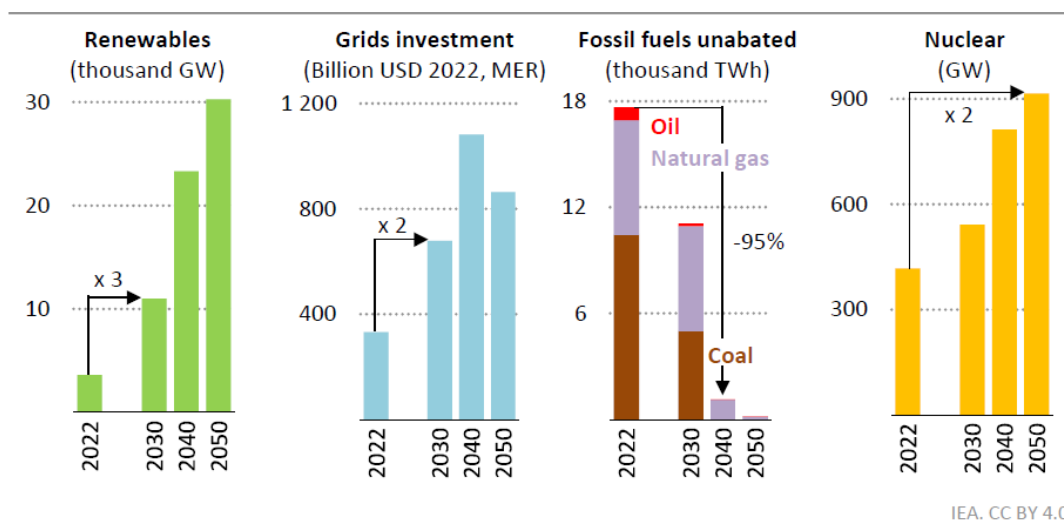
I combustibili fossili eliminati con CCUS rappresentano un ulteriore 5%. I combustibili fossili, esclusi quelli utilizzati per scopi non energetici, diminuiranno da circa 75% della fornitura totale di energia nel 2022 a circa il 5% entro il 2050. Le loro emissioni saranno compensate attraverso tecnologie di rimozione del carbonio.

In totale, compresi gli usi non energetici, i combustibili fossili rappresenteranno meno del 20% dell'approvvigionamento energetico totale nel 2050, invertendo la loro quota odierna pari a circa l'80% dell'approvvigionamento energetico totale, compresi gli usi non energetici.

6.4.3.2 Le pietre miliari dello scenario NZE

Il percorso della IEA fissa quattro tappe fondamentali per il raggiungimento degli obiettivi, senza delle quali potrebbe essere seriamente compromesso il futuro del pianeta.

Figura 48: Tappe fondamentali per il settore elettrico nello scenario NZE



IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA, Net Zero Roadmap 2023, pag.80 (Aggiornamento 2023)

Esse sono:

- La triplicazione della capacità globale di energie rinnovabili entro il 2030 rispetto al livello di 3.630 GW nel 2022. Ciò porta la quota di energie rinnovabili nella produzione di elettricità a salire dal 30% nel 2022 a circa il 60% nel 2030. Entro il 2050 nello scenario NZE, la capacità installata totale di energie rinnovabili sarà otto volte superiore al livello del 2022 generando quasi 90 % della fornitura globale di elettricità.
- Il raddoppio degli investimenti nella rete entro il 2030. Nello scenario NZE, le reti di trasmissione e distribuzione dell'elettricità si espandono per soddisfare la crescente domanda di elettrificazione, collegare migliaia di nuovi progetti di energia rinnovabile e rafforzare i sistemi che necessitano di adattarsi alle mutevoli dinamiche del sistema. Gli investimenti annuali globali nelle reti fino al 2030

raggiungono i 680 miliardi di dollari e resteranno a un livello elevato fino al 2050. Quasi il 70% di questi investimenti è destinato alle reti di distribuzione con l'obiettivo di espandere, rafforzare e digitalizzare le reti. Oltre all'aumento degli investimenti, le riforme normative e politiche dovranno tempestivamente facilitare lo sviluppo, la modernizzazione e l'efficientamento delle reti per sostenere le transizioni verso l'energia pulita.

- La riduzione del 95% entro il 2040 dell'uso continuo di combustibili fossili per generare elettricità, compresa l'eliminazione completa e progressiva dei combustibili fossili e del carbone. Le emissioni derivanti dal carbone non abbattute ammontavano a quasi 10 Gt di CO_2 nel 2022, costituendo quasi il 75% del totale del settore elettrico e il 27% delle emissioni totali del settore energetico. Nonostante una spinta temporanea derivante dalla crisi energetica, la quota di carbone nella produzione globale di elettricità scende rapidamente nello scenario NZE dal 36% nel 2022 al 13% nel 2030, e a 0 entro il 2040.³² Le fonti di generazione a basse emissioni aumentano così rapidamente che nello scenario NZE non è prevista la costruzione di nuove centrali a carbone (oltre i 150 GW in costruzione all'inizio del 2023). L'uso del gas naturale per la produzione di elettricità, che ha generato 2,8 Gt di CO_2 nel 2022, contribuendo per poco più del 20% alle emissioni del settore elettrico, diminuirà di oltre l'80% entro il 2040. L'uso del petrolio nelle centrali elettriche, invece, che ha generato ulteriori 0,5 Gt di emissioni nel 2022, sarà completamente eliminato.
- Il raddoppio dell'energia nucleare, passando da 417 GW nel 2022 a 916 GW nel 2050. Nonostante questa crescita, la quota di energia nucleare diminuisce in termini percentuali rispetto al totale generato. Infatti quest'ultima passerà dal 9% nel 2022 a l'8% nel 2050.³³

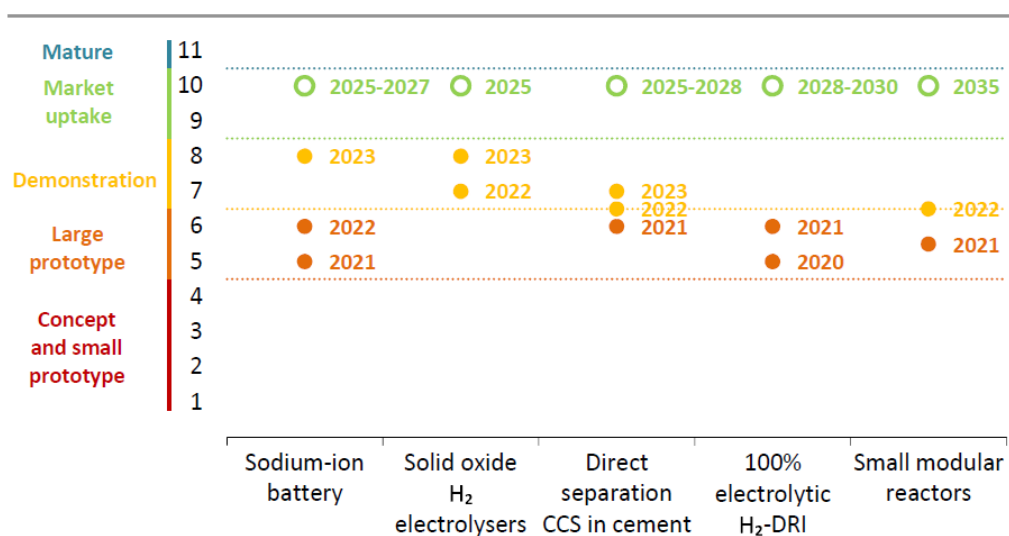
³² L'eliminazione graduale del carbone è già in corso e oltre 90 paesi, che rappresentano quasi tutta l'energia elettrica alimentata a carbone nel mondo, si sono impegnati a eliminare gradualmente il carbone in modo specifico o a fissare obiettivi di zero emissioni nette (IEA, 2022a).

³³ Per perseguire gli obiettivi di riduzione delle emissioni e affrontare le preoccupazioni sulla sicurezza energetica, diversi paesi hanno annunciato strategie che includono un ruolo significativo per l'energia nucleare, tra cui Canada, Cina, Francia, India, Giappone, Corea, Polonia, Regno Unito e Stati Uniti. All'inizio del 2023, in 18 paesi del mondo erano in costruzione reattori nucleari per un totale di 64 GW. Nel lungo termine, più di 30 paesi che oggi accettano l'energia nucleare aumentano il loro utilizzo nello scenario NZE.

6.4.4 L'impatto dell'innovazione nel modello

Nello scenario NZE 2021, alle tecnologie all'epoca non disponibili sul mercato erano dovute quasi la metà (50%) delle riduzioni delle emissioni necessarie nel 2050 per raggiungere lo zero netto. Nell'ultima revisione è sceso a circa il 35% visti i rapidi progressi registrati (basti pensare alla prima commercializzazione di batterie agli ioni di sodio annunciata per il 2023 e alle dimostrazioni su scala commerciale di elettrolizzatori di idrogeno a ossido solido).

Figura 49: Livello di preparazione tecnologica per le tecnologie selezionate rispetto agli obiettivi di maturità tecnologica nello scenario NZE



IEA. CC BY 4.0.

Fonte: IEA, Net Zero Roadmap 2023, pag.71 (Aggiornamento 2023)

6.4.5 Le infrastrutture

Oggi gran parte dello slancio è rivolto alle piccole tecnologie modulari di energia pulita come il solare fotovoltaico e le batterie, ma queste da sole non sono sufficienti per garantire emissioni nette pari a zero, oltre che rappresentare la parte meno impegnativa dal punto di vista economico.

Al fine di avere un sistema energetico pulito ed efficiente sarà necessario investire il prima possibile nelle seguenti infrastrutture:

- Grandi reti infrastrutturali nuove ed intelligenti³⁴;
- Riconversione delle reti esistenti affinché possano trasportare “le nuove fonti energetiche”, come l’idrogeno;
- Impianti di produzione e stoccaggio di grandi quantità di energia e di carburanti a basse emissioni (batterie, idrogeno verde e biocombustibili in primis);
- Tecnologie per la cattura della CO₂ dalle ciminiere e dall'atmosfera (*Carbon Capture, Utilisation and Storage - CCUS*³⁵);
- Nuovi siti di energia nucleare;
- Vaste aree destinate alle energie rinnovabili.

Le reti di trasmissione e distribuzione dell’energia elettrica dovranno espandersi di circa 2 milioni di chilometri ogni anno fino al 2030 per soddisfare le esigenze dello scenario NZE. Oggi la costruzione delle reti può richiedere più di un decennio con un collo di bottiglia particolarmente dispendioso in termini di tempo e burocrazia. Lo stesso vale per gli altri tipi di infrastrutture energetiche citate. I decisori politici, l’industria e la società civile devono lavorare insieme per coltivare una mentalità del “costruire in grande” e accelerare il processo decisionale, preservando al tempo stesso l’impegno pubblico e rispettando la tutela dell’ambiente.

La cattura, l’utilizzo e lo stoccaggio del carbonio, l’idrogeno (combustibili a base di idrogeno inclusi) e la bioenergia sostenibile sono fondamentali per raggiungere emissioni nette pari a zero. Sebbene la recente ondata di progetti annunciati per CCUS e idrogeno sia incoraggiante, la maggior parte deve ancora prendere una decisione finale sugli investimenti e necessita di ulteriore sostegno politico per stimolare la domanda e facilitare nuove infrastrutture abilitanti, pertanto risultano ancora inferiori alle aspettative.

³⁴ Una rete intelligente (o “*smart grid*”) è un insieme di reti di informazioni e di reti di distribuzione dell’energia, prettamente elettrica. Ottimizza la distribuzione dell’energia, consentendo la decentralizzazione delle centrali di produzione. Minimizzati i sovraccarichi e le variazioni della tensione elettrica.

³⁵ Le tecnologie di cattura, utilizzo e stoccaggio del carbonio (identificate come CCUS) sono molto importanti nella transizione energetica in atto poiché permettono di recuperare carbonio da fonti emissive imprescindibili, anche a basso impatto, oltre che dall’ambiente. Si distinguono in tecnologie per la cattura e lo stoccaggio diretto del carbonio nell’aria (DACCS) e in tecnologie per la cattura e lo stoccaggio del carbonio da emissioni dovuti al processo di generazione da bioenergia (BECCS). [74]

Nello scenario NZE, invece, non risultano necessari nuovi progetti *upstream*³⁶ di petrolio e gas a lungo termine, né lo sono nuove miniere di carbone, ampliamenti di miniere o nuovi impianti a carbone “non abbattuti”. Tuttavia, sono necessari investimenti continui negli *asset* esistenti di petrolio e gas e nei progetti già approvati. Al fine di evitare picchi dannosi dei prezzi o eccessi di offerta, è fondamentale sequenziare il declino degli investimenti nell’offerta di combustibili fossili e l’aumento degli investimenti nell’energia pulita.

6.4.6 *Gli investimenti necessari*

Nel 2023 gli investimenti per la *green economy* dovrebbero essere prossimi alla cifra record di 1,8 trilioni di dollari. Secondo il percorso oggetto di analisi, questa cifra dovrà salire a circa 4,5 trilioni di dollari l’anno entro l’inizio degli anni 2030. È previsto un rientro degli stessi nel tempo attraverso la riduzione delle bollette e del carburante. Entro il 2050 gli investimenti nel settore energetico e le bollette del carburante saranno inferiori rispetto a oggi in termini di percentuale del PIL globale. Il balzo più netto è previsto nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo diverse dalla Cina, dove aumenteranno di sette volte entro l’inizio degli anni ’30 nello scenario NZE. Ciò richiederà politiche nazionali più forti insieme a un sostegno internazionale maggiore e più efficace. I finanziamenti annuali agevolati per l’energia pulita nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo dovranno raggiungere circa 80-100 miliardi di dollari entro l’inizio degli anni ’30.

6.4.7 *I rischi legati alla transizione sicura*

Il rapporto IEA mirato alla neutralità carbonica 2050, oltre a fornire le linee guida per raggiungere l’obiettivo, mette in guardia anche circa i possibili rischi a cui il mondo potrebbe andare incontro, in seguito alle azioni suggerite.

I principali scenari critici sono:

- I conflitti geopolitici tra Paesi importatori ed esportatori di combustibili fossili. Il drastico calo della domanda dei combustibili fossili, infatti, riduce i rischi tradizionali per la sicurezza energetica ma non li annulla, poiché i consumi di quest’ultimi non scompaiono. Inoltre, nello scenario NZE, i produttori a costi più elevati vengono esclusi da un mercato in declino e l’offerta inizia a concentrarsi nei grandi detentori

³⁶ Il settore *upstream* reperisce e lavora gli idrocarburi e viene spesso denominato settore “Exploration and Production” (E&P)

- di risorse le cui economie sono più vulnerabili al processo di cambiamento (rischio innesco nuove crisi energetiche). Quindi, se il mondo riuscisse a ridurre la domanda di fossili abbastanza rapidamente da raggiungere emissioni nette pari a zero entro il 2050, i nuovi progetti si troverebbero ad affrontare gravi rischi commerciali, con ripercussioni sulla stabilità della nuova configurazione energetica.
- La forte concentrazione delle catene di approvvigionamento, rischio analogo al punto precedente, potrebbe presentarsi nella fornitura di metalli e minerali critici, oltre che delle tecnologie pulite. Per cui è fondamentale che tutti gli stati investano in ricerca e sviluppo nel settore energia al fine di scongiurare la creazione di nuovi monopoli. Un esempio eclatante è l'attuale fornitura delle tecnologie fotovoltaiche da parte della Cina (detentore di circa l'80% del mercato globale) oppure la fornitura di uranio da parte della Russia, con il relativo *know how* nucleare.
 - Il sostegno economico alle famiglie. Entro il 2030 nello scenario NZE, la spesa energetica totale delle famiglie nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo diminuirà del 12% rispetto al livello odierno, e ancora di più nelle economie avanzate. La diminuzione riflette i grandi risparmi energetici e i costi derivanti dall'efficienza energetica e dall'elettrificazione. Tuttavia, i politici devono sostenere le famiglie, in particolare quelle a basso reddito, per far fronte ai costi iniziali, spesso più elevati, delle tecnologie energetiche pulite.
 - Il ritardo nell'implementazione delle tecnologie potrebbe seriamente compromettere il raggiungimento dell'obiettivo di 1,5°C, come analizzato nel caso di azione ritardata. Tra i rischi più lampanti, che potrebbero portare allo slittamento delle ambizioni previste per il 2030, troviamo l'impiego massiccio di tecnologie di rimozione del carbonio che attualmente sono costose e non ancora disponibili su larga scala. Quasi 5 Gt di CO_2 dovrebbero essere rimosse dall'atmosfera ogni anno durante la seconda metà di questo secolo. Se le tecnologie di rimozione del carbonio non riuscissero a raggiungere risultati su tale scala, non sarebbe possibile riportare la temperatura a 1,5°C, senza il rafforzamento di altre componenti della strategia, con i relativi extra costi. La rimozione del carbonio dall'atmosfera quindi, ad oggi, è costosa e incerta.
 - La sicurezza dell'approvvigionamento elettrico diventa fondamentale. Poiché l'elettricità diventa il "nuovo petrolio" del sistema energetico globale, sarà necessario

rendere il sistema elettrico sempre più flessibile e stabile, mediante sistemi di accumulo e approvvigionamenti da fonti stabili e flessibili, oltre che poco impattanti in termini di emissioni e in grado di fornire rapide risposte alla domanda (come il nucleare, i combustibili fossili con impianti CCUS, energia idroelettrica, biomassa, idrogeno e ammoniaca). Mentre le fonti rinnovabili “tradizionali”, come l’idroelettrico, sono controllabili, le fonti rinnovabili come quella fotovoltaica ed eolica sono caratterizzate da una generazione variabile durante l’arco della giornata, poiché fortemente dipendenti dalle condizioni meteorologiche non sempre prevedibili. Questo contribuisce a rendere più complessa la gestione del dispacciamento e, in particolare, il bilanciamento istantaneo tra domanda e offerta di energia elettrica, rendendo la rete più soggetta a rischio black-out. È imprescindibile, inoltre, la realizzazione di reti di trasmissione e di distribuzione moderne, ampliate e sicure dal punto di vista informatico.

6.4.8 *L’importanza della cooperazione internazionale*

Il percorso NZE non contempla un basso livello di cooperazione internazionale per limitare il riscaldamento a 1,5°C, né tanto meno ritardi qualora dovessero insorgere divergenze tra i Paesi.

L’analisi prevede che entro il 2035 le emissioni dovranno diminuire dell’80% nelle economie avanzate e del 60% nei mercati emergenti e nelle economie in via di sviluppo rispetto al livello del 2022.

Figura 50: Emissioni lorde, assorbite ed emissioni nette nelle economie avanzate nello scenario Net Zero, 2010-2050

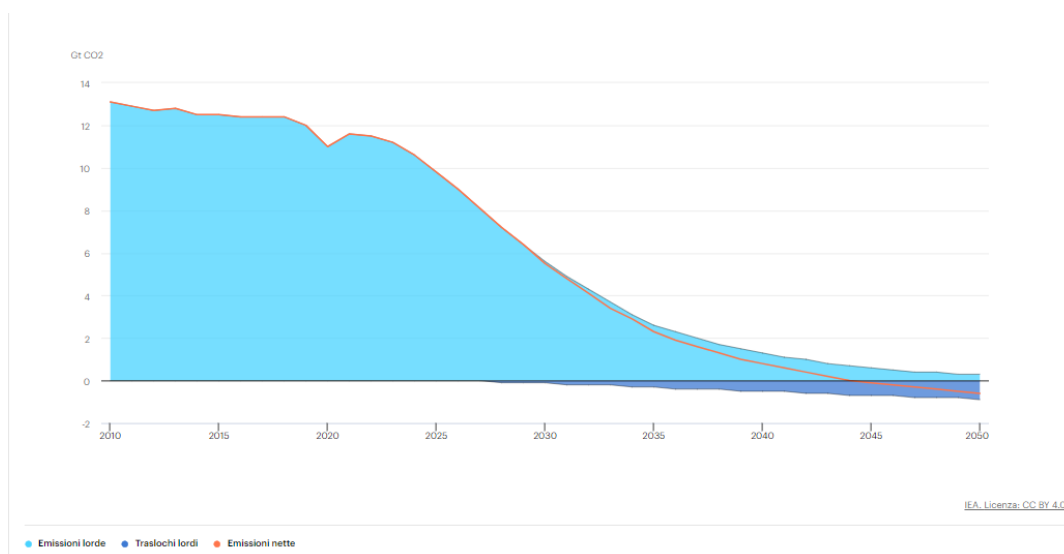
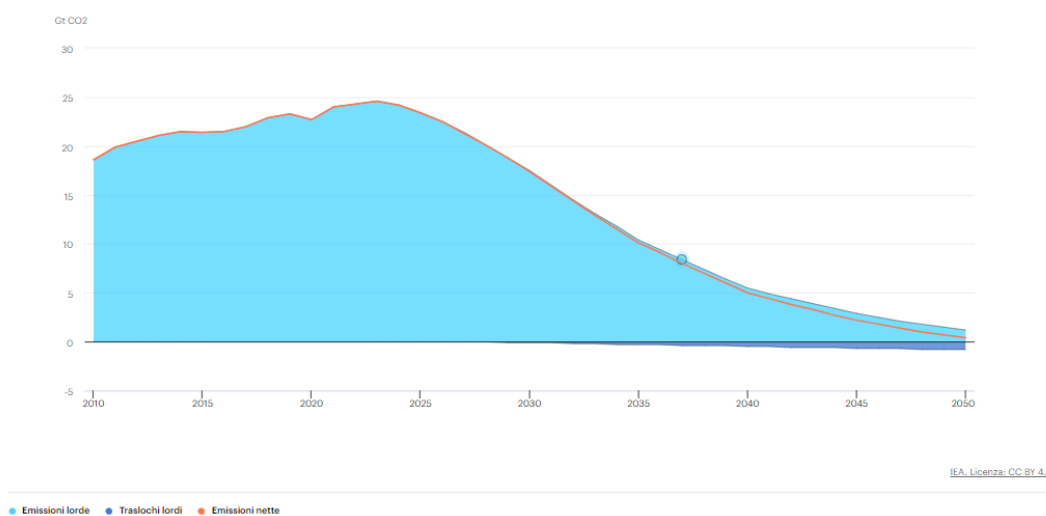


Figura 51: Emissioni lorde, assorbite ed emissioni nette nelle economie emergenti e in via di sviluppo nello scenario Net Zero, 2010-2050



Fonte: IEA [35] [36]

Gli attuali contributi determinati a livello nazionale, nonostante i progressi e gli sforzi profusi, non sono ancora in linea con gli impegni assunti dai singoli paesi in materia di emissioni nette zero, e, tali impegni, non sono sufficienti per mettere il mondo sulla strada verso l'azzeramento delle emissioni nette entro il 2050. Sarà pertanto fondamentale che gli organismi internazionali, specialmente in occasione della COP28 e il primo Global

Stocktake ai sensi dell'Accordo di Parigi, forniscono una chiave di volta per migliorarne l'ambizione e l'attuazione.

“La COP28 dovrà essere la COP della credibilità climatica, con tutti i piani, gli impegni e i finanziamenti allineati alla velocità e alla portata dell'azione necessaria per prevenire i peggiori impatti della crisi climatica. Possiamo ancora evitare un futuro di catastrofi climatiche sempre più gravi, ma siamo fuori strada e il tempo sta per scadere. I Paesi devono concordare una tabella di marcia che riporti l'ambizione e l'azione climatica globale in linea con la limitazione del riscaldamento globale a 1,5°C. Non possiamo permetterci di avere un'altra COP in cui l'ambizione e l'azione non vengano accelerate. Quanto prima e con maggiore decisione agiremo, tanto prima le persone e la natura potranno raccogliere i benefici di un futuro più pulito, sicuro e stabile.”³⁷

Visto l'obiettivo globale di emissioni nette zero entro il 2050, a causa dei ritardi precedentemente citati, quasi tutti i paesi devono anticipare le date fissate per l'azzeramento netto. In particolare le economie avanzate che assumono un ruolo guida e dovranno raggiungere lo zero netto di emissioni nette entro il 2045 circa per bilanciare il ritardo di altri mercati emergenti ed economie in via di sviluppo lo faranno solo ben dopo il 2050.

Il settore energetico sta cambiando più velocemente di quanto molti pensino, ma c'è ancora molto da fare e il tempo stringe. Lo slancio proviene non solo dalla spinta a raggiungere gli obiettivi climatici, ma anche dalle ragioni economiche sempre più forti a favore dell'energia pulita, dagli imperativi di sicurezza energetica, dai posti di lavoro e dalle opportunità industriali che accompagnano la nuova economia energetica. È necessario accelerare lo slancio per essere in linea con l'obiettivo di 1,5°C e per garantire che il processo di cambiamento funzioni per tutti. Questo deve essere uno sforzo unitario in cui i governi mettono da parte le tensioni e trovano modi per lavorare insieme su quella che è la sfida decisiva del nostro tempo. Tutti noi, e ancor di più le generazioni future, ricorderemo con gratitudine coloro che agiscono in base all'urgenza del presente.

³⁷ Dichiarazione del 28 Novembre 2023 di Manuel Pulgar-Vidal, responsabile globale per il clima e l'energia del WWF e già presidente della COP20. [75]

Capitolo 7

IL RUOLO DEL NUCLEARE NELLA TRANSIZIONE

L'energia nucleare ha un ruolo incerto nella futura transizione energetica. Alcuni Paesi la considerano come la fonte migliore per produrre energia priva di carbonio nel breve termine e nella giusta misura per alimentare intere società, altri sostengono che i pericoli connessi alla fissione nucleare, così come gli aspetti economici coinvolti, porterà all'abbandono della stessa a favore delle energie rinnovabili o del gas naturale.

7.1 La storia del nucleare

L'energia nucleare nasce ufficialmente nel 1934 con gli esperimenti portati avanti da un gruppo di scienziati italiani sotto la guida del fisico Enrico Fermi. Gruppo di ricerca noto anche con il nome di "ragazzi di via Panisperna", dove al civico 90 risiedeva la sede dell'istituto "Regio istituto di fisica" dell'Università di Roma. Gli studi furono portati avanti nel 1938 dal chimico tedesco Otto Hahn che, per la prima volta, riuscì a dimostrare il principio della fissione nucleare sul quale si basa ancora oggi il funzionamento di una centrale nucleare: l'impatto di un neutrone con un nucleo di uranio 235 dà luogo a più frammenti³⁸ e al rilascio di una quantità considerevole di energia. L'esperimento di Hahn portò a una serie di ricerche, tra cui quella del fisico teorico Lise Meitner e del nipote, Otto Frisch, che fornirono la prima spiegazione teorica della fissione nucleare. Successivamente, nel 1939, il fisico teorico ungherese Leo Szilard, basandosi su queste scoperte, concepì l'idea di una reazione nucleare a catena controllata, in grado di generare una grande quantità di energia.

Nel corso della seconda guerra mondiale la ricerca sul nucleare ottenne ampi investimenti da entrambe le parti in conflitto al fine di creare una super bomba in grado di segnare la superiorità tecnologica. La task-force americana, attraverso il "*Progetto Manhattan*", il 2

³⁸ Gli studi di Hahn confermarono in tal modo l'ipotesi della fissione già avanzata nel 1934 dalla chimica Ida Noddack.

dicembre 1942 alle 14:20 ora locale, sotto le gradinate dello stadio del campus dell'Università di Chicago, capitanata da Enrico Fermi, iniziò la prima reazione nucleare a catena auto-alimentata attraverso il “*Chicago Pile-1*”, ovvero il primo archetipo di reattore artificiale a fissione nucleare al mondo. Così, l’America riuscì per prima a conquistare padronanza della tecnologia nucleare e, successivamente, sarà la prima ad applicare la stessa ai fini bellici con la costruzione della bomba atomica. Il 6 agosto 1945 la prima bomba atomica fu lanciata sulla città giapponese di Hiroshima causando la morte di migliaia di civili ma anche la fine della seconda guerra mondiale. Da quel giorno il mondo non ha conosciuto più altri conflitti bellici mondiali anche grazie alla contrapposizione degli armamenti nucleari a disposizione dei due macro blocchi della guerra fredda.

Negli anni '50 gli studi militari sull'energia nucleare furono portati avanti anche sul piano civile per la realizzazione dei primi reattori nucleari e delle prime centrali atomiche in grado di generare energia elettrica. Nel 1954 il presidente degli Stati Uniti, Eisenhower, approvò ufficialmente il progetto “*Atom for Peace*” al fine di agevolare l'introduzione dell'energia nucleare in applicazioni civili e per la produzione di energia elettrica. [37]

La prima centrale elettrica con reattore nucleare fu realizzata nel 1955 nello Stato dell'Idaho, negli Stati Uniti, dove il reattore civile chiamato *Borax III* venne collegato alla rete della città di Arco, facendola diventare la prima città al mondo a utilizzare solo energia atomica. [38]

A metà degli anni '50 il consenso politico ed economico sull'uso dell'energia nucleare era molto accentuato ed era dettato dalla speranza di usufruire di energia più economica rispetto alle fonti energetiche convenzionali, in particolar modo in occidente. Erano molto forti le aspettative, come si evince dal discorso del 1954 di Lewis Strauss, presidente della *United States Atomic Energy Commission*, che in un convegno di scrittori scientifici sostenne: «*Non è troppo aspettarsi che i nostri figli usufruiranno nelle loro case di energia elettrica troppo economica per poter essere misurata*». [39]

7.2 Lo sviluppo del nucleare civile

Dalla sua nascita nel dopoguerra, l'energia nucleare ha conosciuto una notevole crescita con progressi significativi sia nella ricerca scientifica che nella produzione di energia elettrica. Inizialmente focalizzata su scopi militari durante la Seconda Guerra Mondiale, la tecnologia

nucleare si è rapidamente evoluta verso utilizzi pacifici, principalmente per la produzione di energia.

Negli anni '50 e '60, molte nazioni svilupparono programmi nucleari per sfruttare il potenziale energetico della fissione nucleare. Gli Stati Uniti, l'Unione Sovietica, il Regno Unito e altri paesi iniziarono a costruire centrali nucleari per la produzione di elettricità, contribuendo così a una crescita che avrebbe costituito circa il 5% della produzione mondiale di energia nel corso di questi decenni.

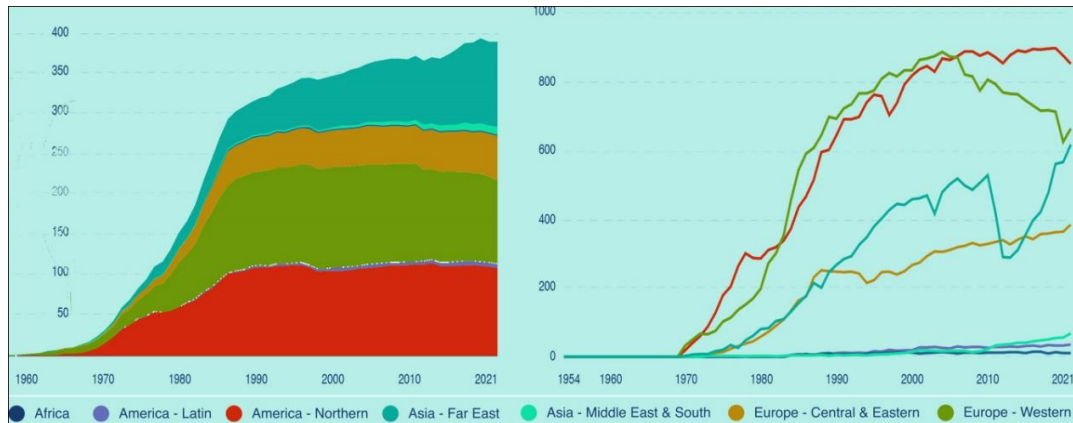
I primi reattori erano di tipo *LWGR*, moderato a grafite e raffreddato ad acqua leggera, come quelli russi³⁹, oppure di tipo *BWR*, ovvero moderato ad acqua leggera bollente, di matrice Americana. La tecnologia prese sempre più piede nel panorama energetico mondiale e, pian piano, aumentarono sia i Paesi che l'adottarono che gli impieghi. Basti pensare al primo prototipo commerciale di reattore a neutroni veloci (il "BN-350"), avviato nel 1972, con una capacità di progettazione di 135 MWe (netti), ideato per fornire elettricità e calore per desalinizzare l'acqua del Mar Caspio.

Durante gli anni '70 e '80, la crescita dell'energia nucleare raggiunse il suo apice, costituendo circa il 16% della produzione mondiale di energia elettrica. Numerosi reattori furono costruiti in tutto il mondo, alimentati dalla crescente domanda di energia elettrica e dalla consapevolezza ambientale. Tuttavia, questo periodo vide anche un declino a seguito di eventi significativi, come l'incidente di Three Mile Island negli Stati Uniti nel 1979 e l'incidente di Chernobyl in Unione Sovietica nel 1986. Questi eventi gettarono un'ombra sulla sicurezza nucleare e influenzarono negativamente la percezione pubblica dell'energia nucleare.

Negli anni '90 e nei primi anni del XXI secolo, la costruzione di nuovi reattori rallentò notevolmente in molte nazioni e la quota dell'energia nucleare nella produzione mondiale di energia elettrica scese al 12%. Diminuzione dovuta alle forti preoccupazioni circa la sicurezza nucleare e alla gestione dei rifiuti radioattivi. Anche l'aumento dei costi di costruzione e di gestione del processo contribuì a una maggiore cautela nell'adozione dell'energia nucleare.

³⁹ L'impianto nucleare militare di Obninsk, in Russia nel 1954, con un reattore del tipo LWGR, è stato il primo al mondo ad alimentare utenti civili per due MW tramite una turbina aggiunta e un alternatore collegato alla rete;

Figura 52: Potenza nucleare in servizio nelle varie regioni in GW (a sinistra) e produzione di elettricità in TWh (a destra) dal 1954 al 2021

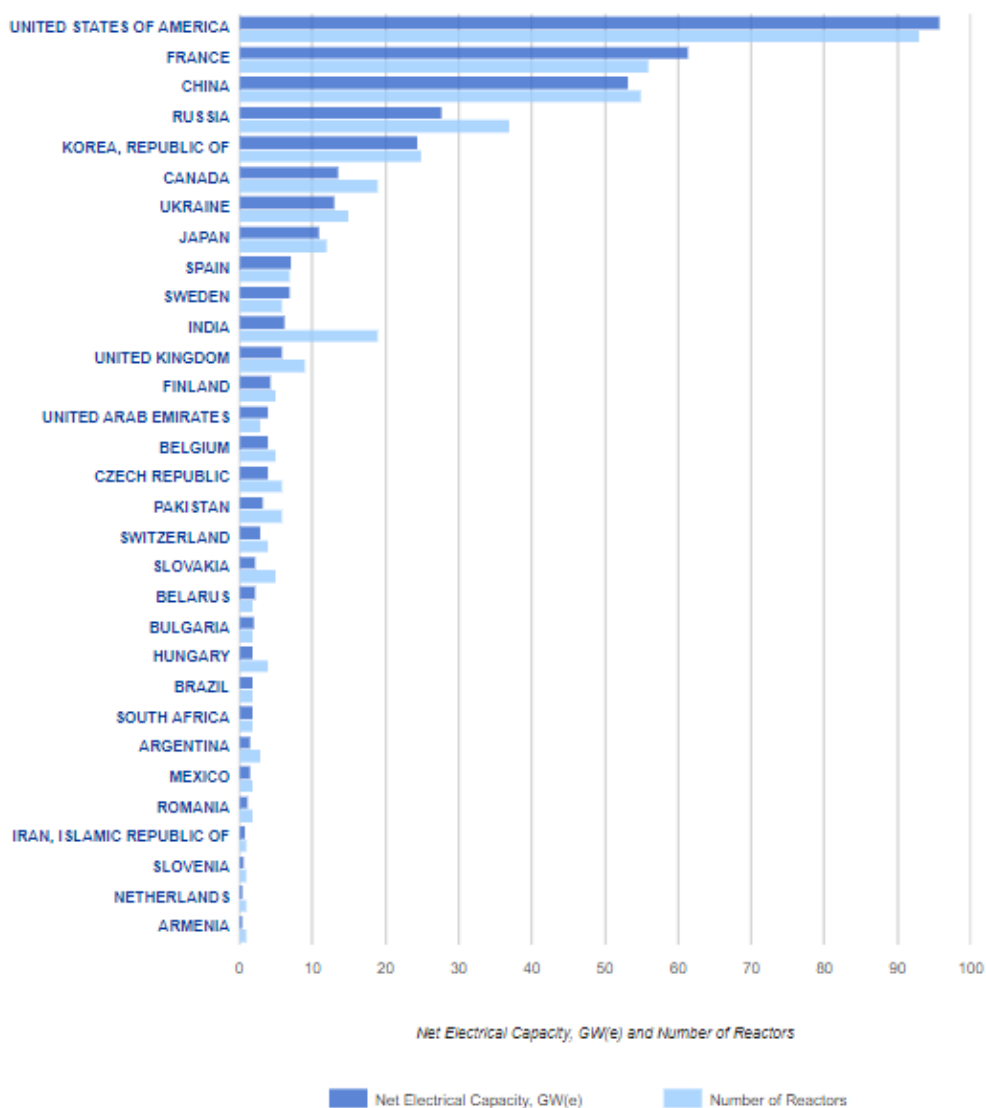


Fonte IAEA - PRIS-Power Reactor Information System, www.iaea.org/pris, 2022 IAEA

Ciononostante, alcuni paesi, come la Cina, continuarono ad investire nella costruzione di nuove centrali cercando di affrontare la crescente domanda di energia in modo sostenibile. Negli ultimi anni c'è stato un rinnovato interesse per l'energia nucleare come parte delle strategie per affrontare i cambiamenti climatici e ridurre le emissioni di gas serra. Oggi (dicembre 2023) la quota di energia nucleare nella produzione mondiale di energia si attesta di poco al di sopra del 9%, con una produzione di 370.170 MW⁴⁰, prodotti da 412 reattori in 31 Paesi, come si evince dall'immagine seguente. [40]

⁴⁰ Non sono stati inclusi 25 reattori, di cui 21 installati in Giappone e 4 in India, poiché attualmente sospesi, per una capacità totale netta pari a 21.228 MW. Il totale installato ammonta quindi a 391 GW

Figura 53: Produzione netta di energia elettrica e numero di reattori per Paese



Fonte: Pris.Iaea.org [40]

7.3 Le centrali nucleotermoelettriche e i combustibili nucleari

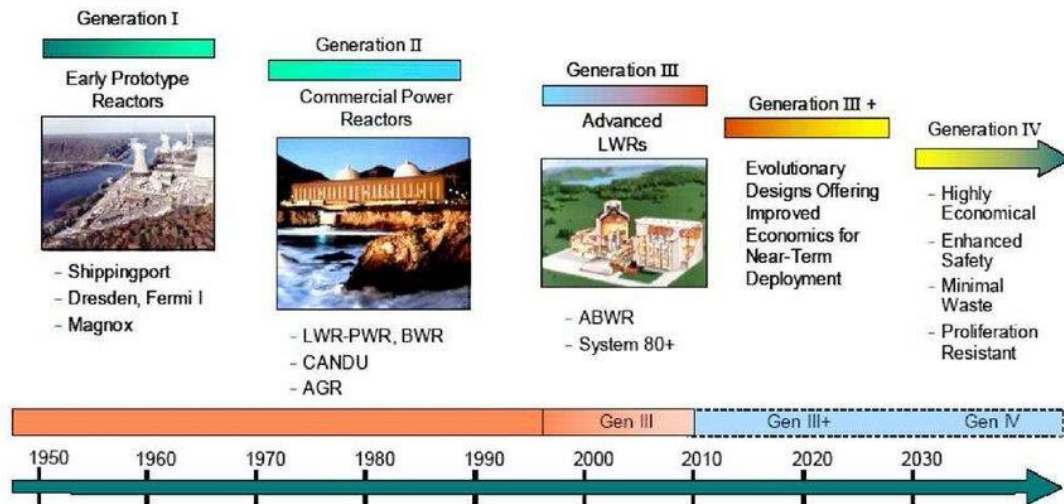
Le centrali nucleotermoelettriche condividono la medesima struttura di base delle centrali termoelettriche, equipaggiate con turboalternatori dotati di turbine a vapore. Tuttavia si differenziano per il fatto che l'energia termica necessaria alla produzione del vapore non è generata tramite combustione chimica, bensì attraverso un processo di fissione nucleare. Il "combustibile" impiegato è costituito da materiale fissile, che può essere uranio naturale, uranio arricchito con l'isotopo fissile U235, o plutonio fissile Pu239. Il cuore di queste

centrali, noto come nocciolo, è il sito in cui avviene la reazione nucleare accompagnata dalle azioni di moderazione e refrigerazione. La moderazione è finalizzata a prolungare la permanenza dei neutroni in prossimità dei nuclei, agevolando così il processo di fissione. La refrigerazione, invece, estrae l'energia termica generata e la trasferisce agli scambiatori di calore responsabili della produzione di vapore. Il controllo della reazione è gestito mediante l'utilizzo di adeguate barre di controllo, realizzate in cadmio o boro, che catturano i neutroni e possono rallentare il processo fino a interromperlo completamente. Senza approfondire i dettagli, va sottolineato che la natura del combustibile e i mezzi di moderazione e refrigerazione costituiscono il discriminante tra i diversi tipi di reattori, tra i quali:

- Reattori a uranio naturale, moderati a grafite e raffreddati a gas, come ad esempio i *GCR* (*Gas Cooled Reactor*) e gli *AGR* (*Advanced Gas Reactor*).
- Reattori a uranio arricchito, moderati e refrigerati con acqua, come i *BWR* (*Boiling Water Reactor*) e i *PWR* (*Pressurized Water Reactor*).
- Reattori veloci autofertilizzanti *FBR* (*Fast Breeder Reactor*). Questi reattori non richiedono moderatore, perché utilizzano combustibile con elevata percentuale di materiale fissile e producono al loro interno isotopi radioattivi. Approccio che consente l'aumento dell'efficienza nello sfruttamento del combustibile nucleare.

Dal punto di vista storico, queste tecnologie hanno attraversato tre generazioni di reattori a fissione. La prima generazione è ormai fuori servizio (come illustrato nella Figura 54). La seconda generazione include molti reattori ancora in funzione, come ad esempio i reattori della centrale di Fukushima Daiichi, tutti appartenenti alla categoria *BWR* di seconda generazione, costruiti negli anni '70. Successivamente agli incidenti di Three Mile Island nel 1979 e di Chernobyl nel 1986, la ricerca si è concentrata sull'aumento della sicurezza dei reattori, mantenendo alcune delle tecnologie della seconda generazione. Ciò ha portato allo sviluppo della terza generazione, rappresentata ad esempio dall'*EPR* (*European Pressurized Reactor*), basato sul *BWR* e implementato in Francia e Finlandia. Un'altra espressione della terza generazione è l'*AP1000* della Westinghouse Electric, basato sul *PWR* e attualmente in costruzione in diverse parti del mondo, compresa la Cina, gli Stati Uniti e, nel 2022, anche in Polonia. La tecnologia *AP1000* era stata inizialmente selezionata per le quattro nuove centrali nucleari in Italia, progetto successivamente cancellato dopo l'incidente di Fukushima nel 2011.

Figura 54: Evoluzione dei reattori a fissione



Fonte: F. Piglione, G. Chicco, Sistemi Elettrici Industriali – Parte II, pag.48, 2022/2023

Nel frattempo, negli anni '80, è iniziato lo studio dei reattori di quarta generazione, caratterizzati da tecnologie innovative e approcci basati sulla sicurezza passiva. Alcuni di questi sono già stati realizzati in Cina (ma non ancora commercializzati), e attualmente il Canada ha progetti in corso per costruirne uno entro il 2026.

I problemi di avviamento e le capacità di regolazione delle centrali nucleari sono simili a quelli caratteristici delle centrali termoelettriche. Queste tipologie di centrali vengono spesso adoperate a potenza massima, principalmente per ragioni economiche. Ciò è dovuto al fatto che la contaminazione radioattiva e il conseguente deterioramento del nocciolo e delle parti esposte alle radiazioni limitano significativamente la vita utile di tali impianti, che varia da 20 a 40 anni. Al termine di questo periodo, è necessario procedere allo smantellamento (*decommissioning*) dell'impianto. Per ottenere il massimo ritorno economico, è quindi fondamentale generare la massima quantità di energia possibile durante la vita operativa dell'impianto.

Sebbene le centrali nucleari siano tra le meno inquinanti durante il normale funzionamento, il rischio potenziale in caso di incidente è estremamente elevato, come dimostrato dall'incidente di Fukushima. Un ulteriore problema è rappresentato dalle scorie generate dal combustibile esausto, che rimangono radiotossiche per molte centinaia di anni. Attualmente queste scorie vengono immagazzinate in siti geologici altamente stabili, ma questa soluzione è oggetto di controversie e non è considerata definitiva. [41]

7.4 L'energia nucleare e il Net Zero Emissions

Come riportato nel paragrafo 6.4.3, l'*effort* dell'energia nucleare rappresenta la quarta tappa fondamentale per il settore elettrico nello scenario NZE 2050. L'apporto del nucleare, stando al percorso in analisi, deve più che raddoppiare, passando dai 391GW nel 2023 a 916 GW nel 2050, diminuendo solo di un punto percentuale rispetto alla totale fornitura elettrica, attestandosi quindi all'8% rispetto all'attuale 9%.

Il ritorno al nucleare rappresenta già il mezzo per perseguire obiettivi di riduzione delle emissioni e affrontare le preoccupazioni sulla sicurezza energetica. Diversi paesi, tra cui Canada, Cina, Francia, India, Giappone, Corea, Polonia, Regno Unito e Stati Uniti nei loro piani di sviluppo sostenibile in termini ambientale hanno fortemente puntato su questa fonte. All'inizio del 2023, in 18 Paesi del mondo erano in costruzione reattori nucleari per un totale di 64 GW. Nel lungo termine, più di 30 Paesi che oggi accettano l'energia nucleare aumenteranno il loro utilizzo nello scenario NZE.

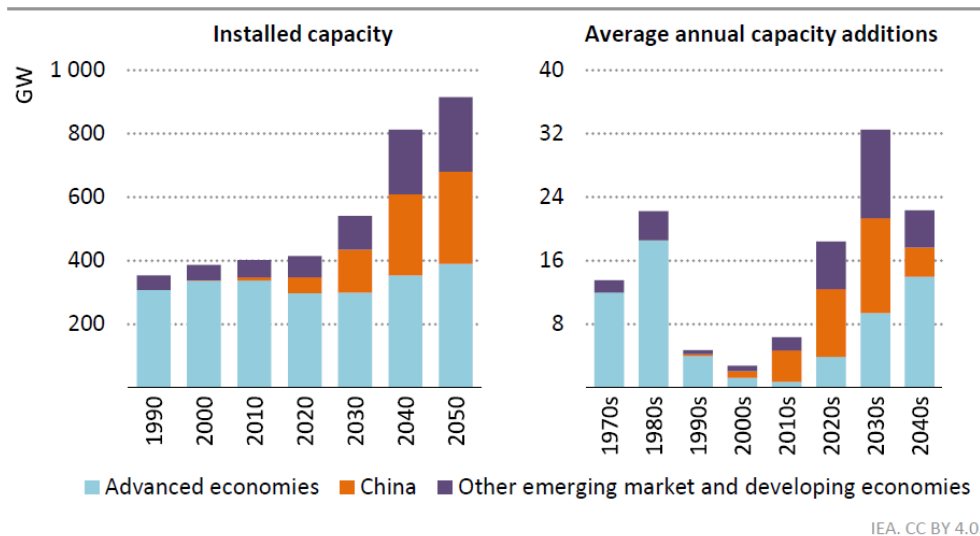
Per raggiungere il raddoppio complessivo della capacità nucleare entro il 2050, sarà necessario implementare una media di 26 GW di nuova capacità ogni anno, dal 2023 al 2050, di cui una parte sarà necessaria per compensare il pensionamento delle centrali a fine vita.

Per poter attuare quanto previsto, sarà necessario un investimento medio annuo di oltre 100 miliardi di dollari, ovvero circa il triplo rispetto al livello degli ultimi anni.

Dopo il completamento dei progetti già in corso, il picco di espansione arriverà negli anni 2030, con una media annua di nuova capacità nucleare di 33 GW, segnando un nuovo massimo per l'industria nucleare⁴¹.

⁴¹ Attualmente il massimo incremento annuo registrato risale al 1985, con una potenza nucleare installata pari a 26,75 GW. [ottenuto mediante elaborazione propria del database dell' Energy Institute Statistical Review of World Energy <https://www.energyinst.org/statistical-review>]

Figura 55: Capacità dell'energia nucleare e aumenti di capacità medi annuali nello scenario NZE, 1990-2050



Fonte: IEA [32], pag.82

Come riportato nella figura precedente, la Cina rappresenta l'economia che maggiormente svilupperà il nucleare, rappresentando circa un terzo di tutta la nuova capacità mondiale fino al 2050, mentre altri mercati emergenti ed economie in via di sviluppo rappresentano quasi un altro terzo. Nelle economie avanzate, invece, dove i reattori sono in funzione in media da oltre 35 anni, le aggiunte di capacità nucleare aumentano nel tempo in gran parte per compensare la dismissione dei reattori esistenti, nonostante lo scenario preveda, nei limiti del possibile in termini di sicurezza ed efficienza, la massima estensione possibile della durata di vita delle centrali attive. A queste "a fine vita" è affidato un ruolo indispensabile poiché, parte di un approccio economicamente vantaggioso, fondamentali per raggiungere emissioni nette pari a zero entro il 2050.

Tutti i Paesi stanno rivolgendo sempre più l'attenzione verso le nuove tecnologie nucleari avanzate, compresi i progetti di reattori di grandi dimensioni (generazione III+ e IV) e piccoli reattori modulari (SMR).

Sebbene la più grande opportunità per l'energia nucleare sia nel settore elettrico, la nuova energia nucleare nello scenario gioverà anche a ridurre le emissioni provenienti ad altri ambiti, come la produzione del calore e dell'idrogeno verde, prodotto quindi con fonti a basse emissioni.

7.4.1 L'utilizzo dell'elettricità dal nucleare per produrre idrogeno e calore

La diffusione dell'idrogeno a basse emissioni rappresenta un elemento cruciale per raggiungere gli obiettivi della Neutralità Climatica (NZE), con un notevole impegno finanziario che passerà da quasi zero (oggi) a 80 miliardi di dollari l'anno fino al 2040. Secondo le previsioni dei costi legati alla NZE, la produzione di idrogeno attraverso gas naturale con cattura e stoccaggio del carbonio (CCUS) o mediante elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili emerge tra le opzioni più convenienti. Tuttavia il nucleare potrebbe giocare un ruolo significativo anche in questo panorama a patto che i costi di investimento si riducano a un intervallo compreso tra 1.000 e 2.000 dollari per kilowatt (kW). Per competere efficacemente con le alternative menzionate, è essenziale che il settore nucleare riduca notevolmente i costi di implementazione. Un'opzione per migliorare l'economia del nucleare potrebbe essere la collocazione di reattori in prossimità di utilizzatori di idrogeno, eliminando così i costi di trasporto. La NZE stima che l'elettricità nucleare in eccesso potrebbe essere impiegata per produrre circa 20 milioni di tonnellate di idrogeno entro il 2050, sottolineando il potenziale contributo del nucleare alla produzione di idrogeno a basse emissioni.

Si aprono, inoltre, interessanti prospettive per la cogenerazione di calore dalle centrali nucleari. Questa pratica potrebbe sostituire il teleriscaldamento e trovare applicazioni in utilizzi ad alta temperatura. Affinché anche questa soluzione diventi competitiva sul mercato, i costi di costruzione delle centrali nucleari dovrebbero ulteriormente ridursi, attestandosi nell'intervallo di 2.000-3.000 USD/kW.

7.4.2 NZE senza il nucleare

La contro-argomentazione secondo cui gli obiettivi di zero emissioni nette entro il 2050 possono essere raggiunti senza l'energia nucleare, seppur contemplata, è un problema per due ragioni principali:

- Un calo dell'uso dell'energia nucleare nelle economie avanzate richiederebbe sostanziali aumenti degli investimenti nelle energie rinnovabili, stimati pari a circa 1,6 trilioni di dollari fino al 2040, che verrebbero trasferiti ai consumatori. L'IEA stima che il costo della fornitura di energia elettrica per le economie avanzate senza il prolungamento della durata dei reattori attuali e gli investimenti

nella costruzione di nuove centrali nucleari, sarebbe in media di circa 80 miliardi di dollari in più all'anno.

- Le centrali nucleari sono considerate fonti più affidabili di generazione di elettricità dispacciabile rispetto alle fonti rinnovabili e meno soggette alla volatilità dei prezzi rispetto ai combustibili fossili. La dispacciabilità si riferisce alla certezza a lungo termine che una fonte di energia elettrica soddisfi la domanda energetica in ogni momento, fondamentale almeno per soddisfare il fabbisogno del carico base della rete, vista l'intermittenza generativa delle fonti rinnovabili (al netto degli impianti di accumulo attualmente poco sviluppati e con costi ancora troppo elevati).

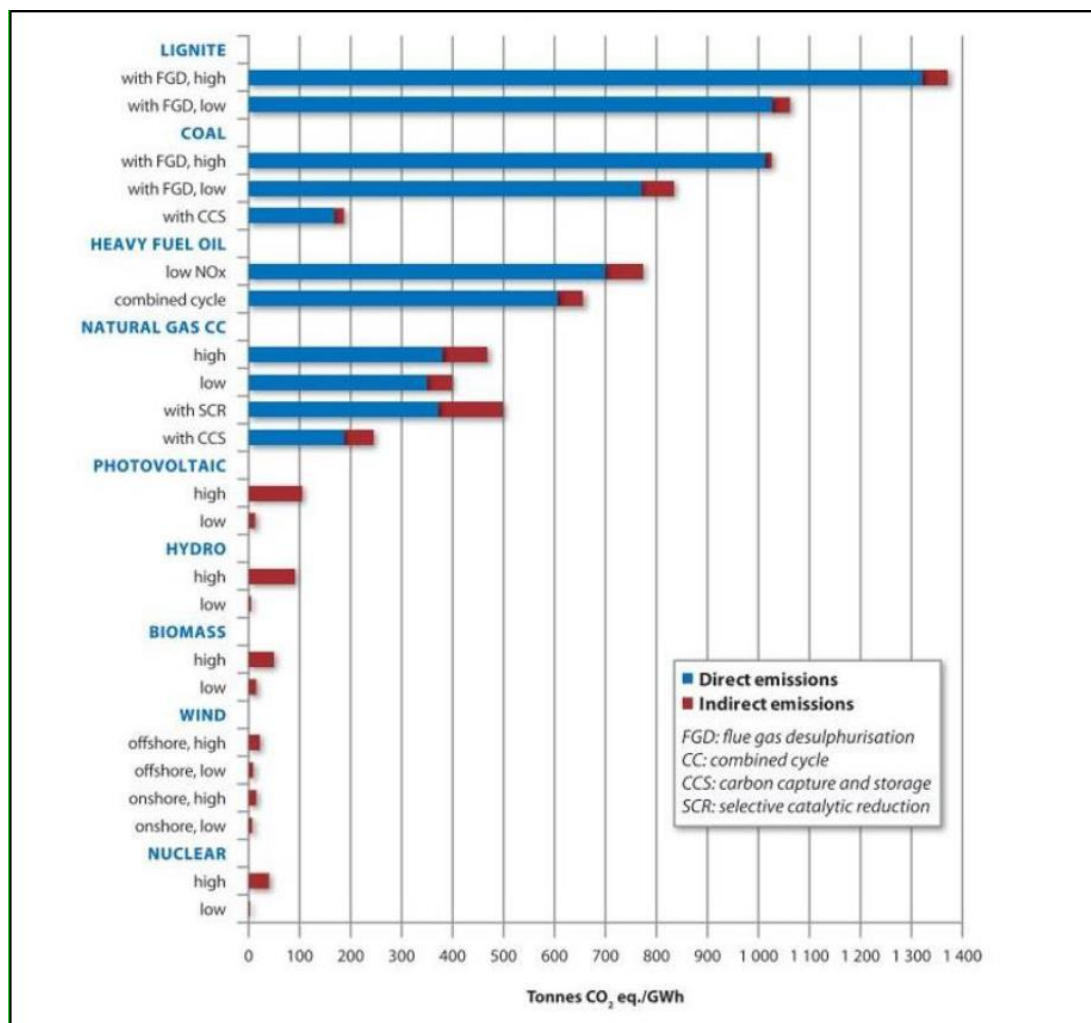
7.5 I vantaggi del nucleare oggi

Di seguito saranno presentate le motivazioni chiave a favore dello sviluppo dell'energia nucleare nell'attuale economia energetica globale, considerando il cambiamento climatico come fattore chiave e, come altre importanti forze motivanti, l'importanza della sicurezza energetica e delle relazioni estere.

7.5.1 *Le emissioni dirette e indirette*

Il fattore principale da prendere in considerazione nell'adozione di nuove fonti energetiche o nell'espansione delle fonti energetiche attuali sono le emissioni di CO_2 e l'intensità del carbonio nell'intero ciclo di vita, spesso definita anche "costo energetico" e "impronta di carbonio", che misura il numero di grammi di CO_2 emessi nella generazione di un'unità di elettricità per kilowattora. L'intensità di carbonio è definita dall'OCSE come "*il prodotto dell'inverso dell'efficienza del carburante e... del fattore di emissione ponderato in ingresso*". [42] Quindi, più alto è il rapporto, maggiore sarà l'intensità di carbonio della fonte di elettricità e minore l'efficienza energetica.

Figura 56: Emissioni dirette e indirette di gas serra provenienti da vari sistemi di generazione di energia



Fonte: Organisation for Economic Co-operation Development, 2013

Il tasso di intensità di carbonio per il nucleare è compreso tra l'intervallo 15-50 gCO₂/kWh, derivante dalle emissioni indirette generate in fase di costruzione delle centrali e dal processo di arricchimento dell'uranio, come riportato in figura 56.

Sebbene l'energia idroelettrica e la biomassa non emettano direttamente gas serra, le emissioni del loro ciclo di vita sono considerate sostanziali rispetto all'energia solare, eolica e nucleare.⁴²

⁴² L'emissione di gas serra riguardanti l'idroelettrico sono dovute alla fermentazione dei sedimenti presenti nelle acque del bacino e sono stimate pari all'1,3% delle emissioni globali antropiche. [66] Quelle delle biomasse, sono in parte attribuibili alla combustione, ma anche al trasporto e alla movimentazione delle stesse.

Rispetto alla durata media di venticinque anni degli impianti rinnovabili, come l'energia eolica e solare, l'energia nucleare è un'opzione molto vantaggiosa a lungo termine, poiché un singolo reattore normalmente funziona per almeno quaranta anni (o addirittura fino a 80 anni dopo l'estensione della durata di vita). Le estensioni della durata di vita del nucleare sono generalmente competitive sia in termini di costi rispetto ad altre fonti di elettricità a basse emissioni (compresi l'eolico e il solare fotovoltaico), che in termini di emissioni. Infatti, maggiore sarà la vita dell'impianto, minore sarà l'apporto delle emissioni indirette annue.

L'eolico, il solare e il nucleare sono le uniche fonti di energia le cui emissioni di gas serra sono dovute solo alle fasi di costruzione e non al funzionamento nel loro intero ciclo di vita. [43]

7.5.2 La sicurezza energetica

L'ascesa dell'energia nucleare come uno dei principali candidati per l'adeguamento del mix energetico per la produzione di elettricità, oltre all'attrattiva derivante dalla minore intensità di carbonio, è supportata anche dalla sua idoneità a fornire stabilità al sistema elettrico dal punto di vista finanziario⁴³ e geografico [44]. A differenza di altre fonti energetiche alternative, l'energia nucleare non dipende dalla direzione o dalla velocità del vento, dalla copertura nuvolosa o dalla foschia, quindi rappresenta una fonte di energia sempre dispacciabile e in grado di funzionare in luoghi diversi purché sia vicino a una grande fonte d'acqua necessaria per il raffreddamento. Per questo motivo, poiché potrà e dovrà garantire l'inerzia del sistema elettrico mondiale, nei modelli ipotizzati per la transizione energetica riveste un ruolo di fondamentale importanza.

Il nucleare, inoltre, presenta caratteristiche interessanti anche per quanto concerne la stabilità del suo approvvigionamento di combustibile. Infatti, nonostante i combustibili nucleari non siano di facile reperimento e negoziati da pochi Paesi, gli approvvigionamenti previsti sono costanti ed eseguiti con frequenze molto lunghe (a volte superano anche i 12-18 mesi), riducendo notevolmente l'esposizione a rischi legati alle forniture nel breve periodo. Quindi risulta particolarmente vantaggioso nei casi di instabilità politica con possibili ripercussioni

⁴³ Non si fa riferimento ai costruzioni delle centrali, che verranno trattati in seguito, ma solo ai mancati investimenti in altre tecnologie necessari per compensare le fluttuazioni di produzione elettrica da fonti rinnovabili o per ricorrere a forniture "straordinarie" di combustibili.

sull'approvvigionamento energetico, diversamente da quanto osservato in precedenza per petrolio e gas.

Oggi, sebbene l'Ucraina sia un paese che riceve la maggior parte delle sue forniture di combustibile nucleare dalla Russia, la guerra in corso non ha interrotto la produzione di elettricità delle sue centrali nucleari per mancanza di combustibile e nel frattempo l'Ucraina ha avviato un processo di diversificazione delle proprie fonti di carburante per includere gli approvvigionamenti della Westinghouse (Fornitore USA). [45]

7.5.3 La ridotta occupazione del suolo

L'energia nucleare presenta un vantaggio significativo in termini di ridotta occupazione del suolo rispetto ad alcune fonti rinnovabili. Questo aspetto è attribuibile principalmente all'alta densità energetica delle centrali nucleari che consente la produzione di grandi quantità di elettricità in spazi relativamente contenuti. A differenza delle estese aree necessarie per impianti solari ed eolici, le centrali nucleari concentrano la loro capacità in una limitata area, riducendo i costi associati all'occupazione del suolo.

Ad esempio, se consideriamo i dati forniti dal Dipartimento dell'Energia americano, un impianto per la produzione di energia nucleare occupa un'area almeno 360 volte inferiore a un impianto eolico e almeno 75 volte inferiore a uno solare. Se vogliamo vederla in un altro modo, una centrale nucleare può sostituire 431 turbine eoliche da 2.3 MW o 3125 pannelli solari da 320 watt. [46]

Anche la flessibilità nella posizione delle centrali nucleari rappresenta un ulteriore vantaggio, poiché possono essere costruite in varie località, sia in prossimità di centri urbani che in aree remote, senza la necessità di estendere imponenti strutture su vasti territori, magari sfruttando infrastrutture e connessioni alla rete già esistenti.

Questo non solo dimostra la compatta efficienza degli impianti nucleari in termini di spazio, ma evidenzia anche la loro capacità di fornire una quantità significativa di energia con una minore impronta territoriale rispetto ad altre fonti rinnovabili. [46]

7.5.4 Le relazioni estere

La responsabilità dello Stato nel fornire elettricità come bene pubblico e nel garantire l'uso responsabile dell'energia nucleare secondo i trattati internazionali, rende lo Stato intrinsecamente coinvolto e rappresentativo delle motivazioni verso l'acquisizione di energia nucleare. Difatti lo Stato è il cliente del mercato energetico e il fornitore di elettricità al

pubblico. Ciò significa che le relazioni tra gli Stati sono un fattore importante da considerare nell'analisi del ruolo dell'energia nucleare nella transizione energetica globale. Sebbene stabilire l'influenza delle relazioni estere sul processo decisionale in materia di energia nucleare non sia semplice, questo può essere ristretto a tre temi principali: guadagni finanziari nelle esportazioni, generazione di dipendenza e raggiungimento di prestigio internazionale. [47]

7.5.4.1 I guadagni finanziari nelle esportazioni

Una motivazione piuttosto ovvia per sviluppare la propria capacità di energia nucleare di un paese è il reddito da esportazione che può generare sia mediante l'esportazione della tecnologia dei reattori nucleari e sia mediante l'esportazione di elettricità generata.

Oggi i Paesi che cercano di guadagnare finanziariamente dall'esportazione di elettricità includono Slovacchia, Bielorussia, Francia, Iran e Ucraina, mentre quelli che cercano di trarre profitto dalle esportazioni di tecnologia nucleare includono Argentina, Cina, Russia, Corea del Sud e Stati Uniti. Quindi i primi tendono a concentrarsi sull'energia nucleare per l'esportazione di elettricità, mentre gli stati fornitori e gli stati in cui la tecnologia nucleare è progettata a livello nazionale tendono a concentrarsi sullo sviluppo di nuove tecnologie da esportare.

7.5.4.2 L'influenza politica

Le dinamiche tra fornitori, consumatori, Stato e regime normativo nucleare internazionale garantiscono un maggiore grado di influenza geopolitica al fornitore di reattori rispetto allo Stato fornitore-consumatore. Il "profondo coinvolgimento" dei governi nelle relazioni sull'energia nucleare è molto accentuato rispetto alle relazioni commerciali riguardanti le altre forme di energia. Questo perché lo stato, in questo caso, è responsabile e garante della corretta regolamentazione e gestione delle emissioni nucleari e radioattive. Responsabilità che rendono lo stato un attore chiave e decisore nelle relazioni nucleari civili.

La fornitura internazionale di energia nucleare richiede ai governi non solo di comunicare, ma anche di cooperare, innovare e impegnarsi reciprocamente per anni. Questo perché è fondamentale la condivisione dei seguenti punti chiave:

- Le strutture di responsabilità e supervisione;
- Le normative nazionali e internazionali;
- La gestione dei rifiuti;

- Le norme di sicurezza internazionali e regionali (questo è significativo soprattutto nell'Europa orientale a causa il disastro di Chernobyl);
- Le trattative per i rimborsi e per i prestiti;
- Lo scambio e la formazione del personale;
- L'applicazione degli standard di sicurezza da parte sia degli Stati coinvolti che delle associazioni internazionali dell'energia nucleare e delle organizzazioni multilaterali, come l'AIEA;

Le relazioni intergovernative sull'energia nucleare favoriscono una maggiore cooperazione quando le imprese commerciali coinvolte sono di proprietà statale. Allo stesso tempo, però, il legame tra l'industria nucleare e lo Stato influisce nella scelta degli Stati clienti con cui cooperare o meno poiché si tende ad associare l'affidabilità dei potenziali fornitori (anche se privati) a quella dello Stato di appartenenza degli stessi.⁴⁴ Ciò significa che le società nucleari civili non sono governate solamente dal profitto, dal mercato e dagli interessi commerciali, ma sono fortemente intrecciate con le politiche internazionali.⁴⁵

Quando i fornitori sono di proprietà dello Stato, questo diventa un elemento ancora più importante nel processo decisionale del cliente.

Inoltre, le forniture nucleari, spesso, sembrerebbero favorire la "fidelizzazione" degli Stati clienti agli Stati fornitori, non solo in ambito energetico, ma anche nel panorama politico nazionale e internazionale. Ad esempio, alcuni osservatori dell'energia ritengono che la strategia dominante delle società energetiche russe sia quella di concentrarsi sui mercati europei per costruire nuove condutture di esportazione sostenute da contratti a lungo termine, al fine di rafforzare le dipendenze del vecchio continente, vincolando i clienti agli acquisti di energia per molti anni nel futuro. [47]

Un altro esempio potrebbe essere il contratto di prestito di 10 miliardi di dollari concesso da Rosatom per realizzare la centrale nucleare di Astravets in Bielorussia. In questo ultimo caso, nel 2011 il tasso di interesse fissato era del 5,23% per metà del prestito e l'altra metà al tasso

⁴⁴ Ad esempio, gli Stati Uniti sono arrivati al punto di inserire la CGN (Azienda nucleare cinese) nella lista nera delle esportazioni nel 2019 a causa del presunto furto di tecnologia militare americana da parte della società, mentre il governo britannico ha espresso cautela sull'acquisto del progetto cinese Hualong One per la costruzione della nuova centrale nucleare Bradwell B, nell'Essex, a causa "dell'approccio che abbiamo visto con Huawei", la società cinese che è stata bandita nel Regno Unito nel 2020 come "venditore ad alto rischio" [62]

⁴⁵ Ad esempio, la società russa Rosatom è stata esclusa dalla gara di fornire un nuovo reattore ad una centrale nucleare nella Repubblica Ceca a causa della mancanza di fiducia nel governo russo in seguito al presunto coinvolgimento della Russia nelle esplosioni mortali avvenute in un deposito di munizioni nella Repubblica Ceca nel 2014. Il governo ceco si è rifiutato di collaborare con Rosatom, sebbene fosse una società e non un ente governativo. [61]

LIBOR per depositi a 6 mesi in dollari USA aumentato di un margine dell'1,83% annuo, il tutto da pagare in 30 rate semestrali uguali. La Russia è stata finora disposta a negoziare più volte negli ultimi anni la ristrutturazione del prestito su richiesta del governo bielorusso, compreso l'adeguamento del tasso e del periodo di rimborso da 25 a 35 anni, modificando il tasso di interesse fisso al 3,3% annuo e posticipando la data di inizio del rimborso del prestito. Analogamente, il prestito di 10 miliardi di euro concesso dallo stato russo per finanziare la centrale nucleare ungherese Paks II è stato modificato più volte da entrambi i governi. [47]

7.5.4.3 Il prestigio

Gli Stati sono spesso spinti a incorporare e potenziare le tecnologie nucleari civili con l'obiettivo di accrescere la loro reputazione a livello internazionale. Questo prestigio può derivare dai livelli di progresso tecnologico raggiunti dal paese e dalla collaborazione con fornitori considerati leader nel settore delle tecnologie nucleari.

Gli stati che attualmente costruiscono centrali nucleari con reattori stranieri (per lo più di progettazione russa o cinese), sottolineandone il prestigio, sono Ucraina, Turchia, Pakistan, Cina, Bielorussia e Bangladesh. Sono mossi dalle stesse motivazioni anche gli Stati che costruiscono reattori di propria progettazione. Questi includono Argentina, Cina, India, Russia e Stati Uniti (vale a dire, tutti i paesi che attualmente stanno costruendo un progetto di reattore nazionale, ad eccezione della Francia).

7.6 Gli svantaggi del nucleare oggi

I vantaggi precedentemente illustrati devono confrontarsi con diversi svantaggi, i quali verosimilmente sono sufficienti a spiegare la limitata diffusione di questa fonte energetica rispetto alle aspettative di qualche decennio fa.

Progettare e realizzare una centrale nucleare, oggi, richiede ingenti investimenti economici e il superamento di moltissime criticità. Queste ultime possono causare ritardi con il conseguente aumento dei costi complessivi e, a volte, portare persino alla mancata esecuzione del progetto.

7.6.1 I costi della tecnologia

Il costo di costruzione di nuovi reattori nucleari, un fattore importante nel determinare gli investimenti relativi alle nuove fonti di generazione dispacciabile è tutt'altro che uniforme

nel mondo, oltre che non perfettamente stimabile vista l'incertezza dei dati resi noti dai vari Paesi.

Si presume che Cina e India siano in grado di costruire nuovi impianti nucleari al costo medio più basso, inferiore a 3.000 dollari/kW, con progetti completati in cinque-sette anni. Ciò significa che un nuovo reattore su larga scala con una capacità di 1,1 GW costerebbe circa 3 miliardi di dollari (nel 2020). Mentre si prevede che i costi medi rimarranno molto più elevati nell'Unione Europea e negli Stati Uniti, anche se diminuiranno progressivamente nei prossimi tre decenni fino a circa 4.500 dollari/kW, partendo da un costo medio attuale che arriva a superare abbondantemente i 6000 dollari/kW installato, come nel caso dell'Unione Europea.

Figura 57: Supposizione costi di costruzione dell'energia nucleare per Paesi selezionati nello scenario NZE entro il 2050 (prezzi del 2020 in USD/kW)

Regione	2020	2030	2050
Unione Europea	6 600	5 100	4 500
stati Uniti	5 000	4 800	4 500
India	2 800	2 800	2 800
Cina	2 800	2 800	2 500

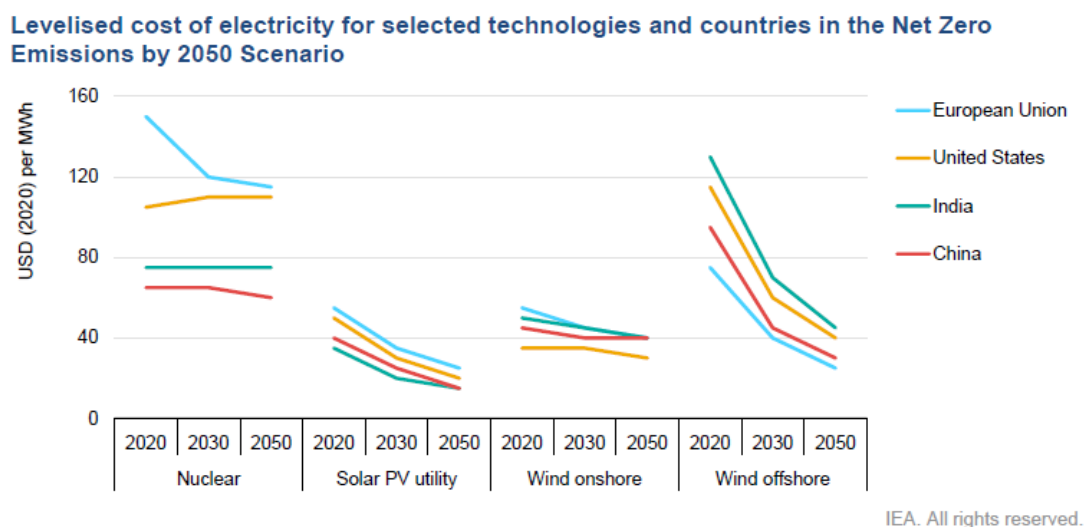
Fonte: IEA, Net Zero entro il 2050: una tabella di marcia per il settore energetico globale, 2021

Per poter procedere con la comparazione dei costi di produzione dell'energia elettrica del nucleare con le alte fonti è necessario introdurre il LCOE (*Levelized Cost of Electricity*) e il VALCOE (*Value-Adjusted Levelized Cost of Electricity*). Il LCOE rappresenta la metrica utilizzata per stimare il costo medio di produzione per generare un chilowattora (kWh) di elettricità da un impianto energetico durante la sua intera vita utile⁴⁶ ed è spesso citato come un indice della competitività complessiva delle diverse tecnologie di generazione elettrica, riconosciuto a livello internazionale. Questo parametro tiene conto di diversi fattori, tra cui i costi iniziali di investimento, i costi operativi, la durata della vita dell'impianto, il costo medio ponderato del capitale (*WACC – Weighted Average Cost of Capital*) e la produzione energetica prevista nel corso degli anni.

⁴⁶ Secondo la definizione fornita dall'ENEA “rappresenta il ricavo medio per unità di elettricità generata necessario a recuperare i costi di costruzione e gestione di un impianto di generazione durante un presunto ciclo di vita finanziaria e di funzionamento”, ovvero il valore attuale netto del costo unitario dell'energia elettrica nel corso della durata di un bene generatore [64]

Ogni fonte energetica ha il suo LCOE specifico e confrontarli può offrire un'indicazione del costo relativo di generazione di energia da diverse fonti.

Figura 58: LCOE diverse tecnologie per Paese nello scenario NZE



Note: Levelised costs for nuclear include the costs of decommissioning.

Source: IEA (2021), [Net Zero by 2050: A Roadmap for the Global Energy Sector](#).

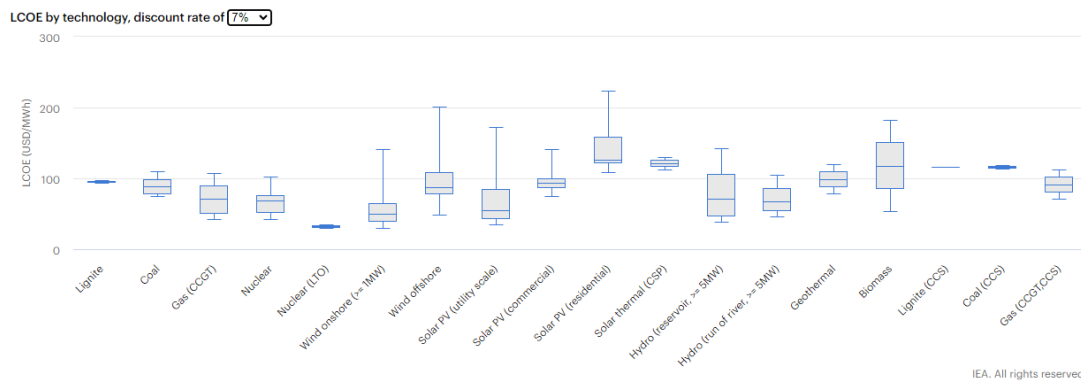
Fonte: IEA, Net Zero entro il 2050: una tabella di marcia per il settore energetico globale, 2021

Come si evince dalla figura 58 sopra riportata, oggi l'energia nucleare è decisamente più costosa della maggior parte delle alternative rinnovabili, in particolar modo nei paesi occidentali, a causa dei maggiori vincoli burocratici e degli elevati standard di sicurezza. Fa eccezione solo l'eolico off-shore, tecnologia giovane, per la quale però sono previsti nei prossimi decenni notevoli riduzioni di costo dovuti alla ricerca e allo sviluppo, oltre che alle economie di scala e di apprendimento⁴⁷.

Diversamente, l'estensione della vita utile delle centrali nucleari già in funzione (“*nuclear LTO*”), fondamentali nello scenario NZE, rappresenta un solido pilastro su cui basare la transizione. Infatti, poiché i costi fissi di costruzione degli impianti sono stati già ammortizzati, qualora ci fossero i presupposti per poter posticipare il fine vita degli impianti di 15 o 20 anni, con le relative licenze, sarebbe possibile generare energia elettrica ad un costo livellato inferiore ai 50 USD/MWh, rendendola fortemente competitiva con il solare e l'eolico, oltre che con le altre fonti energetiche fossili. [48]

⁴⁷ Ad oggi, lo sviluppo delle tecnologie fotovoltaiche hanno fatto registrare una riduzione dei costi pari all'85%. [48]

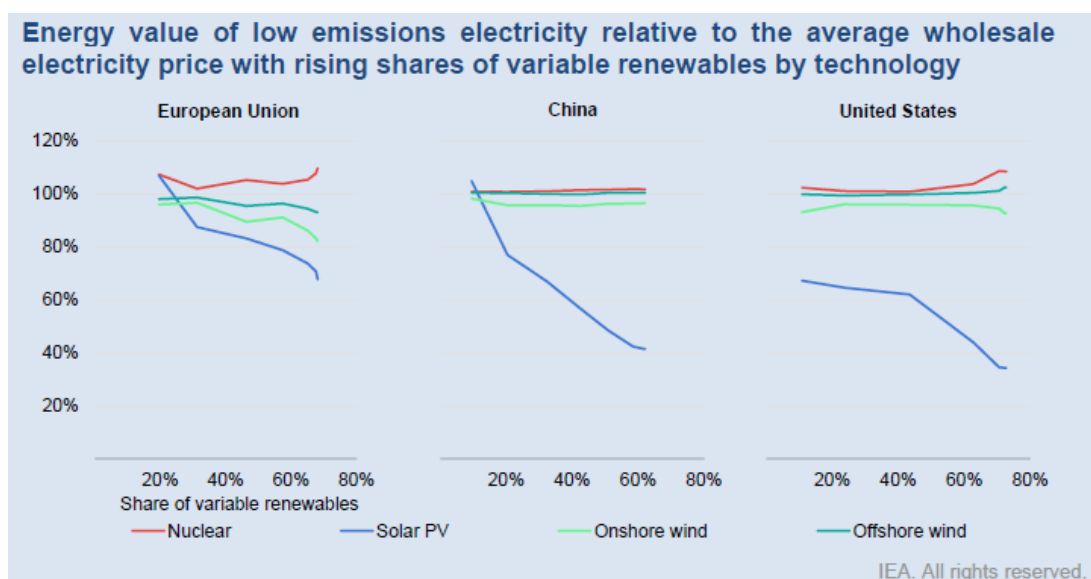
Figura 59: Costi previsti per la generazione di elettricità 2020



Fonte: IEA, 2020 [49]

E' tuttavia importante notare che il LCOE non tiene conto dei diversi aspetti delle varie tecnologie energetiche, come la disponibilità intermittente delle fonti rinnovabili o i costi associati alla gestione dei rifiuti radioattivi nell'energia nucleare. Metriche più complete, come il VALCOE (LCOE aggiustato per il valore), permettono di quantificare il valore di sistema delle diverse tecnologie, valutando il loro contributo sia per l'elettricità a basse emissioni prodotta, che per l'adeguatezza e la flessibilità conferita al sistema. Il VALCOE dell'energia eolica e solare fotovoltaica tende a crescere all'aumentare della loro quota di produzione totale, rendendole meno competitive, mentre quello del nucleare e di altre opzioni di generazione dispacciabile diminuisce, rendendole più competitive e garantendo loro un ruolo maggiore nei sistemi a minor costo rispetto all'LCOE. [48]

Figura 60: Valore marginale dell'energia a basse emissioni per fonte al variare delle quote totali di produzione



Fonte: IEA,2022 [48]

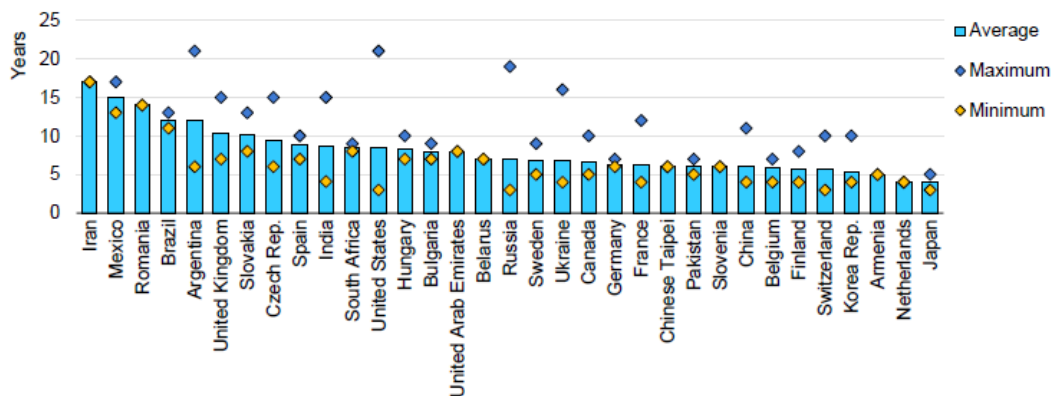
Quindi all'aumentare della quota di energie rinnovabili variabili, il valore energetico di un ulteriore progetto solare fotovoltaico, eolico, o in generale "potenzialmente intermittente", tende a diminuire, diversamente da quello nucleare, quindi dispacciabile, che acquisterà valore.

7.6.1.1 I tempi di costruzione

Come in altri progetti di complessità simile, i progetti nucleari presentano notevoli rischi che potrebbero causare rallentamenti e ritardi nella realizzazione, soprattutto quando si tratta di unità innovative. Globalmente, la costruzione di impianti nucleari richiede in media 7 anni, tuttavia, analizzando gli impianti costruiti dal 1967 al 2021, si nota che 15 di essi hanno impiegato 15 anni o più, mentre 152 sono stati completati in soli 5 anni.

Figura 61: Tempo di realizzazione degli impianti nucleari costruiti dal 1967 al 2021 per Paese

Construction times for new nuclear power plants by country, 1967-2021



IEA. All rights reserved.

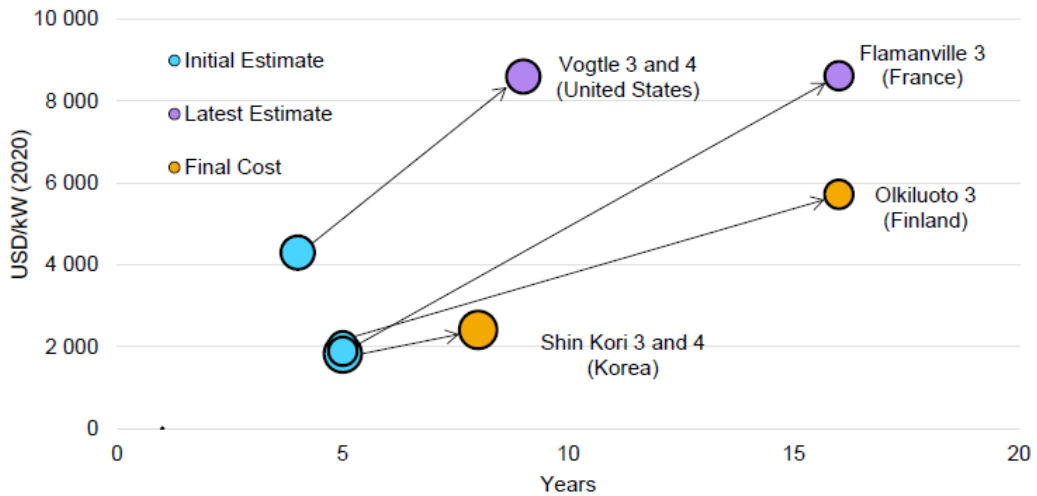
Note: Excluding temporary pauses on construction activities for individual projects.

Fonte: IEA analysis based on IAEA Power Reactor Information System (PRIS)

Dalla medesima analisi emerge che i paesi con programmi nucleari consolidati, come Stati Uniti, Canada, Francia, Cina, Corea e Giappone, hanno generalmente conseguito tempi di costruzione più rapidi. Tuttavia, le licenze, la selezione del sito e i permessi hanno spesso aggiunto diversi anni al processo di completamento di ogni nuovo progetto di reattore nucleare, come riscontrato in recenti progetti di costruzione di centrali nucleari sia in Europa che negli Stati Uniti, con il conseguente superamento dei costi preventivati. Ad esempio, le unità Vogtle 3 e 4 in Georgia (USA), inizialmente preventivate con costo di circa 4.300 dollari/kW e un tempo di realizzazione di quattro anni a partire dal 2014, hanno subito notevoli ritardi che hanno fatto lievitare il loro costo a quasi 9.000 dollari/kW, entrando in funzione solo nel luglio del 2023 (Vogtle 3) e all'inizio del 2024 Vogtle 4, ben nove anni dopo l'inizio della costruzione. Anche in Corea, nonostante le buone prestazioni passate, le unità più recenti hanno sperimentato ritardi e sforamenti dei costi preventivati. E' il caso dei reattori ad acqua pressurizzata Shin Kori 3 e 4, i primi progetti APR1400, commissionati rispettivamente nel 2016 e nel 2019, che hanno registrato rispettivamente ritardi pari a 7,5 e 10 anni rispetto alle previsioni iniziali di 5 anni. Analoghi problemi di ritardi e costi hanno caratterizzato l'EPR, un reattore ad acqua pressurizzata di terza generazione, in Europa.

Figura 62: Costi overnight⁴⁸ e tempi di costruzione relativi a progetti nucleari recenti

Overnight cost and construction times for selected recent nuclear projects



IEA. All rights reserved.

Fonte: Nuclear Energy Agency (2020), Unlocking Reductions in the Construction Cost of Nuclear

I ritardi registrati sono attribuiti a vari fattori, come il basso livello di maturità progettuale all'inizio della costruzione, sfide nella gestione del progetto, cambiamenti normativi e ritardi nella produzione di componenti, oltre che all'instabilità politica. Ad esempio, l'EPR di Olkiluoto in Finlandia, iniziato nel 2005, ha iniziato a generare elettricità nel 2022, con un ritardo di 13 anni rispetto alla data originariamente prevista. Anche l'EPR di Flamanville in Francia, iniziato nel 2007, ha subito notevoli ritardi, con la messa in servizio prevista nel 2023. Entrambi gli EPR hanno superato di gran lunga i costi inizialmente previsti.

La costruzione delle opere civili associate a una centrale nucleare, con particolare riferimento all' "isola" nucleare, che rappresenta il cuore della centrale contenente l'edificio di contenimento, l'edificio ausiliario e l'area di movimentazione del carburante, costituisce tipicamente la principale fonte di ritardi. Curiosamente, questa "isola" rappresenta di solito meno del 20% dei costi totali. Ridurre i costi e il tempo necessario per la costruzione di nuove centrali nucleari sarà cruciale per garantire che l'energia nucleare

⁴⁸ Il costo "overnight" di costruzione dell'impianto è da intendersi come il costo che sarebbe sostenuto per la costruzione dell'impianto se questa fosse "istantanea" (letteralmente "avvenisse nel corso di una notte") e non dilazionata su un lasso di più anni. Il costo overnight di costruzione fotografa quindi una situazione ideale, poiché nella realtà la realizzazione e la messa in servizio di un impianto per la produzione dell'energia è un'attività di durata pluriennale.

possa svolgere un ruolo efficace nel supportare le transizioni energetiche, specialmente nelle economie avanzate. [48]

Visti i ritardi caratteristici del settore e l'entità dei finanziamenti (ordine di miliardi di dollari), è fondamentale la garanzia degli stati nei confronti degli investitori, oltre che la partecipazione quando possibile, al fine di promuovere e far sviluppare la tecnologia in questione.

7.6.1.2 Il costo del capitale

Affinché un impianto produca energia, dopo esser stato realizzato, i principali costi che si devono sostenere sono quelli della manodopera, della manutenzione, del combustibile e del capitale.

Le centrali nucleari convenzionali sono grandi, ad alta intensità di capitale, comportano tempi di realizzazione lunghi e lavori di costruzione complessi. Questi rischi influiscono direttamente sul costo del capitale, aumentando i rendimenti richiesti dagli investitori e, in ultima analisi, sul costo livellato dell'elettricità.

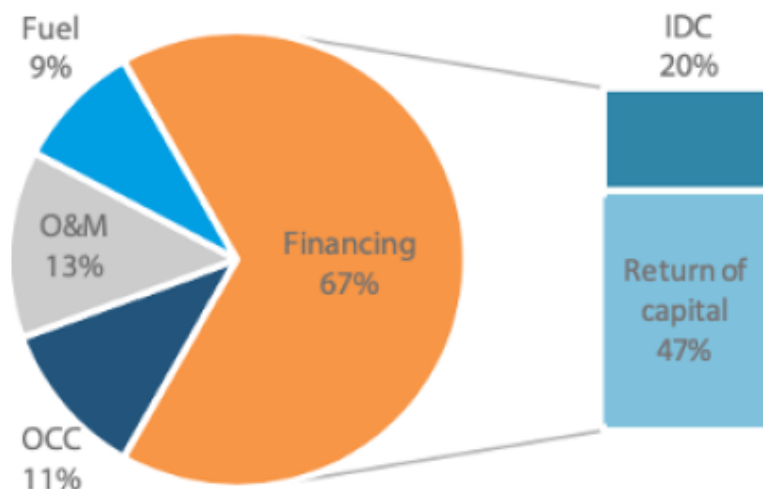
Il capitale viene infatti chiesto in prestito alle banche, o alle associazioni di imprese, a cui va garantito un ritorno percentuale sulla somma prestata, tipicamente tra il 3% ed il 10% annui. Se la costruzione è in ritardo rispetto a quanto pianificato, il debito cresce per interessi e costi della manodopera extra. Nell'ambito nucleare poiché le norme di sicurezza sono molto stringenti, spesso, anche il processo di licenza dell'impianto è molto critico, quindi lungo e costoso. [50]

Per fornire un'idea del costo di un impianto nucleare, quindi delle componenti contemplate nel calcolo del LCOE, precedentemente esposto, di seguito, nella Figura 63, è riportata la scomposizione percentuale del costo livellato dell'energia nucleare per voce di costo, i cui calcoli sono basati su un OCC (*Overnight Construction Costs*) pari a 4.500 USD/kW, un fattore di capacità⁴⁹ (*load factor*) dell'85%, una durata di vita di 60 anni e un tempo di costruzione di 7 anni a un tasso di sconto reale del 9%.

⁴⁹ Si definisce fattore di capacità di un impianto di alimentazione del carico di base il rapporto x/y tra la produzione di energia elettrica effettiva "x" fornita da un impianto di potenza durante un periodo di tempo e la fornitura teorica di energia "y" che avrebbe potuto offrire se avesse operato alla piena potenza nominale in modo continuativo nel tempo.

Figura 63: Ripartizione dei costi per il costo livellato dell'energia nucleare

Grafico 3.4 – Ripartizione dei costi per il costo livellato dell'energia nucleare



Fonte: Organisation for Economic Co-Operation and Development [51]

Il costo totale del capitale è quindi determinato da due macro-voci: i costi di investimento capitalizzati e il rendimento del capitale.

La prima, rispettivamente, include:

- I “costi di costruzione overnight” (*Overnight construction costs* - OCC): ovvero i costi per i materiali, i componenti, la manodopera e il costo del capitale necessari per progettare, costruire e mettere in servizio l'impianto, che rappresentano circa l'11% del totale;
- Gli “oneri finanziari capitalizzati” (*Capitalised Financial Costs* - CFC): ovvero gli interessi in corso di costruzione (*Interest During Construction* - IDC) e le relative commissioni, che rappresentano il 20% del totale;

Il “rendimento del capitale”, invece, è una combinazione del costo del debito (ad esempio del prestito) e del rendimento richiesto del capitale proprio dagli azionisti e rappresenta il 47% del totale.

Nel grafico questa voce è stata isolata con l'IDC con lo scopo di isolare i costi di finanziamento complessivi del progetto. Le restanti voci di costo rappresentate sono:

- Costo del ciclo del combustibile (*Fuel*): rappresenta il costo del combustibile utilizzato per produrre energia elettrica, quindi i costi relativi all'estrazione mineraria, all'arricchimento e alla produzione di gruppi di combustibile da caricare nel nucleo

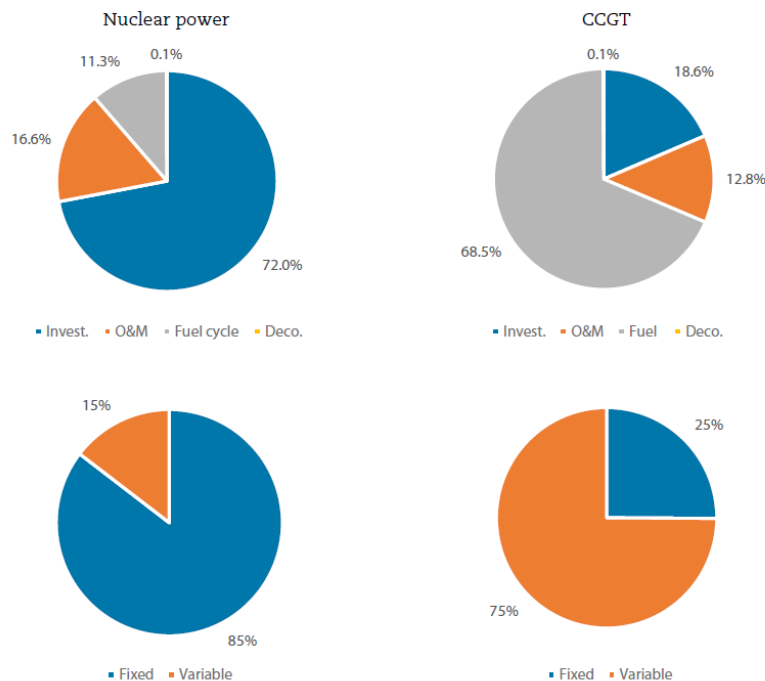
(ovvero attività di front-end), nonché alla gestione del combustibile nucleare usato e dei rifiuti (ovvero attività di back-end).

- Costi di esercizio e manutenzione (*Operations and Maintenance - O&M*): tutti i costi relativi al personale, ai materiali di consumo e alle attività di manutenzione ricorrenti necessarie per il funzionamento in sicurezza una volta che l'impianto è stato costruito e messo in servizio.⁵⁰

Il capitale necessario, con i relativi costi, è una variabile molto discriminante per l'economia nucleare, che spesso, in sede di valutazione degli investimenti, considerando tutti i rischi annessi, induce gli investitori ad optare per altre fonti di energia con un impatto economico meno rilevante, caratterizzato da meno investimenti fissi e maggiori costi variabili.

A scopo illustrativo di seguito è riportato il confronto della scomposizione dei costi caratteristici degli impianti nucleari e degli impianti con turbine a gas a ciclo combinato (CCGT) per evidenziare i modelli economici contrastanti di queste tecnologie.

Figura 64: Benchmark costo di generazione di una centrale nucleare e un impianto CCGT



Fonte: Organisation for Economic Co-Operation and Development [51]

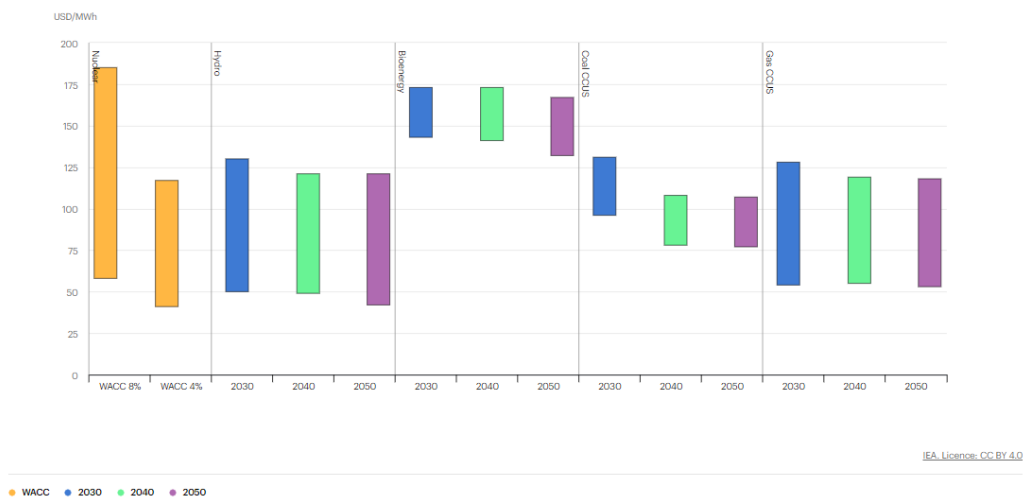
⁵⁰ IL LCOE rappresentato incorpora i costi di smantellamento e non include il costo delle tasse. [51]

Mentre per il nucleare i costi fissi rappresentano circa l'85% del totale, per gli impianti CCGT si attestano appena al 25%, offrendo quindi maggiori margini di manovra nei vari scenari politici ed economici e inferiori perdite di capitale nel caso di mancata produzione.

La tecnologia nucleare risulta quindi fortemente dipendente dal capitale e dal suo costo poiché quest'ultimo ne determina la sua competitività. Al variare di pochi punti percentuali del costo del capitale, come riportato nella Figura 65, il nucleare può risultare altamente competitivo o del tutto svantaggioso rispetto alle altre fonti energetiche (riportato LCOE nucleare con WACC pari a 8% e 4%).

Per garantire lo sviluppo del nucleare e perseguire gli obiettivi prefissati, è necessario che i governi e il mondo della finanza agevolino i finanziamenti per tali investimenti, fornendo maggiori garanzie e riducendo quindi il costo del capitale.

Figura 65: Intervallo LCOE per fonti elettriche dispacciabili a basse emissioni nello Scenario di Sviluppo Sostenibile, 2030, 2040 e 2050



Fonte: IEA [52]

7.6.2 I rischi legati alla produzione

È imprescindibile valutare con attenzione la presenza di una serie di rischi potenziali legati al funzionamento degli impianti nucleari, le cui conseguenze potrebbero avere impatti sull'ambiente e sulla salute umana. I principali sono:

7.6.2.1 La gestione dei rifiuti nucleari

Le scorie radioattive, sottoprodotti dell'energia nucleare, rappresentano una sfida significativa in termini di gestione e sicurezza. Esse derivano principalmente dalle attività di fissione nucleare nei reattori, contenendo isotopi radioattivi con emivite⁵¹ lunghe e pericolose per periodi estremamente lunghi. Queste si distinguono in due tipologie principali: le scorie ad alta attività e a vita lunga, che richiedono una gestione particolarmente attenta, e le scorie a bassa attività e a vita breve, gestibili in modo meno complesso.

Purtroppo non è possibile eliminare del tutto la radioattività contenuta nelle scorie ma, come già detto, è possibile far diminuire in maniera naturale nel tempo il livello di radioattività attraverso il loro confinamento presso un'area protetta, in grado di trattenere le radiazioni dannose per un tempo estremamente variabile che può arrivare fino a decine di centinaia di anni a seconda della tipologia di rifiuto confinato.

Questo implica che gli scarti della produzione nucleare, raccolti in contenitori robusti e sicuri, debbano essere lasciati decadere per lassi di tempo lunghissimi in luoghi lontani dagli esseri umani, garantendo per tutto il periodo di decadimento l'incolumità dei contenitori al fine di preservare l'ecosistema dal materiale radioattivo⁵².

Tuttavia, la scelta dei siti idonei per il deposito delle scorie è un'operazione abbastanza complessa e delicata, resa ancora più ostica dalla scarsa accettazione sociale poiché nessuna comunità accetta di sacrificare il proprio territorio per ospitare rifiuti potenzialmente molto pericolosi.

Anche il trasporto delle scorie radioattive è altrettanto delicato. Queste devono essere spostate in modo sicuro tra i siti di stoccaggio e/o trattamento, con rischi di incidenti durante il trasporto, stradale o ferroviario, che potrebbero portare al rilascio di materiale radioattivo. La sicurezza richiede il rispetto rigoroso di norme e protocolli coinvolgendo le comunità locali e garantendo trasparenza per affrontare preoccupazioni pubbliche sulla sicurezza.

7.6.2.2 Gli incidenti nucleari

Uno dei rischi principali connessi all'utilizzo dell'energia nucleare riguarda le possibili conseguenze nucleari e radiologiche in caso di incidente. Nonostante tali eventi siano rari, i

⁵¹ Tempo di dimezzamento viene definito come il periodo di tempo occorrente affinché la metà degli atomi di un campione radioattivo puro decadano.

⁵² Il rischio principale è la possibile perdita di contenimento, con conseguente contaminazione dell'acqua sotterranea e gravi impatti ambientali.

disastri nucleari passati, in particolare quelli di Chernobyl⁵³ e Fukushima⁵⁴, hanno lasciato un'impronta indelebile nella memoria collettiva. Da allora, l'accettazione dell'energia nucleare, specialmente in Italia, ha subito un notevole cambiamento.

In condizioni normali di esercizio di un impianto nucleare, il rilascio di effluenti nocivi per la popolazione è minimo, costituito principalmente da gas radioattivi che vengono dispersi nell'atmosfera in quantità inferiori all'1% della dose di radioattività derivante da fonti naturali come i raggi cosmici, il radon da uranio e il torio presenti nel terreno. Tuttavia, in caso di incidente, la situazione cambia drasticamente, con la popolazione nelle zone circostanti esposta a livelli di radiazione più elevati e ad un il rischio di malattie spesso mortali, come leucemia e tumori.

Le drammatiche conseguenze radiologiche di Chernobyl hanno evidenziato l'importanza cruciale di garantire la sicurezza degli impianti nucleari, diventando uno degli aspetti critici dell'energia nucleare civile. Negli ultimi anni, il progresso tecnologico ha contribuito a dotare gli impianti di reattori estremamente avanzati, mirati a garantire elevati standard di sicurezza, superando notevolmente quelli presenti nella centrale di Chernobyl.

7.6.3 *La scarsa accettazione sociale*

Uno dei più grandi ostacoli che lo sviluppo del nucleare incontra, implicitamente o esplicitamente, è l'accettazione sociale. Quest'ultima è maggiore negli stati che già utilizzano tecnologie nucleari e molto scarsa nelle altre realtà. Senza il consenso del popolo difficilmente i governi opteranno per soluzioni diverse, anche se estremamente vantaggiose.

Alcuni prerequisiti, spesso carenti, per conseguire in un paese il livello necessario di accettazione sociale dell'energia nucleare sono:

- Comunicazione e informazioni corrette: devono essere diffuse solo informazioni obiettive ed esaurienti. Purtroppo gli esperti nucleari non sempre sono stati in grado di dare spiegazioni chiare e semplici, e, spesso non sono stati messi in condizione di farlo. In materia di energia nucleare e dei problemi annessi, la stampa ha sempre privilegiato l'intenzione di impressionare anziché quella di

⁵³ Nell'aprile del 1986 esplose il più avanzato dei quattro reattori della centrale nucleare di Chernobyl, a poco più di 100 km da Kiev, in Ucraina, all'epoca una delle repubbliche dell'Unione Sovietica. L'esplosione del reattore libera nell'atmosfera una quantità altissima di radiazioni.

⁵⁴ Nel 2011, un terremoto seguito da uno tsunami ha distrutto la centrale nucleare, distruggendo il sistema di raffreddamento e causando il surriscaldamento dei nuclei dei reattori e la contaminazione dell'acqua all'interno dell'impianto con materiale altamente radioattivo.

informare. Non è richiesta una informazione filonucleare, ma semplicemente un'informazione corretta.

- Una condivisione politica “bipartisan” sulla liceità del suo utilizzo: non si può praticare una generazione energetica se parte considerevole dei rappresentanti del popolo si oppone per fini unicamente politici e coltiva le preoccupazioni della gente presentandola come un pericolo.
 - Un organismo di sicurezza nucleare adeguato: in tutti i paesi democratici in cui viene praticata l'energia nucleare le organizzazioni preposte alla sicurezza nucleare tendono ad essere accreditate come garanti della pubblica opinione. Questo ha comportato che tali organizzazioni siano ovunque caratterizzate da una forte accentuazione del loro ruolo di tutela indipendente, da un riconosciuto ed indiscusso livello di competenza scientifica nel settore della sicurezza nucleare e della radioprotezione ambientale. La credibilità pubblica delle autorità di sicurezza nucleare è un fattore essenziale per la praticabilità dell'energia nucleare.
- [53]

È fondamentale informare, coinvolgere e soprattutto non mentire ai cittadini.

7.6.4 *L'apporto energetico reale dell'uranio*

La fissione di un grammo U-235 produce 68 GJ di energia termica. Questo dato spesso lascia ad intendere che i sistemi ad energia nucleare siano ad altissima densità energetica, ma, poiché l'U-235, utile alla fissione nucleare, non si trova libero in natura, per ricavare un grammo di U-235, mediamente, bisogna lavorare 7 tonnellate di minerale lavorato in miniera mediante un processo rischioso e potenzialmente inquinante⁵⁵. Di conseguenza il potere calorifico del minerale contenente U-235 è, mediamente, di 10 MJ/kg se normalizzato per la quantità di minerale naturale estratto e lavorato. Dunque, dire che il nucleare implica una fonte energetica ad altissima densità è per lo meno opinabile dal momento che i dati rivelano che nel migliore dei casi, è comunque sullo stesso ordine di grandezza degli altri combustibili. Infatti il potere calorifico del petrolio è ad esempio di 42 MJ/kg, quello del carbone di 30 MJ/kg e quello della legna 17 MJ/kg. [54]

⁵⁵ Le miniere e le cave devono essere tenute sgombre da infiltrazioni di acqua, che spesso è riversata nei bacini circostanti, con immissione di metalli pesanti e isotopi radioattivi. Nelle miniere sotterranee inoltre è presente gas radon, radioattivo. [63]

7.6.5 Il mercato dell'uranio

L'uranio è un metallo relativamente comune, che si trova nelle rocce e nell'acqua di mare in quantità limitate.

Secondo i dati rilevati dall'OECD sotto riportati è possibile notare che il 90% dei giacimenti di uranio utilizzabile si concentra in soli 10 Paesi.

Figura 66: Disponibilità dell'uranio per Paese

PAESE	TONNELLATE DI URANIO	PERCENTUALE
Australia	1.692.700	28%
Kazakistan	906.800	15%
Canada	564.900	9%
Russia	486.000	8%
Namibia	448.300	7%
Sud Africa	320.900	5%
Brasile	276.800	5%
Niger	276.400	4%
Cina	248.900	4%
Mongolia	143.500	2%
Uzbekistan	132.300	2%
Ucraina	108.700	2%
Botswana	87.200	1%
Tanzania	58.200	1%
Giordania	52.500	1%
Stati Uniti d'America	47.900	1%
Altro	295.800	5%
Totale mondiale	6.147.800	100%

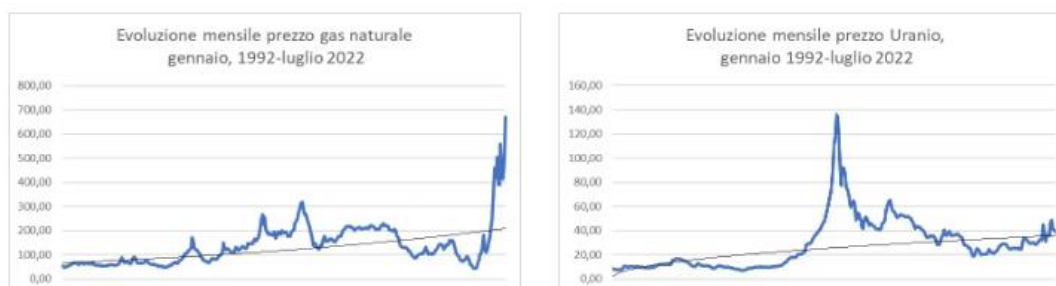
Fonte: OECD NEA & IAEA, Uranium 2020, Resources, Production and Demand

Oltre a questo aspetto negativo, rappresentato dalla concentrazione dei paesi detentori della risorsa, il metallo in questione, una volta estratto, deve essere lavorato, mediante un processo di arricchimento per poter poi essere impiegato come combustibile nelle centrali nucleari. Questo processo è tutt'altro che di semplice realizzazione e pochi Paesi oggi dispongono del *know how* necessario per soddisfare la domanda internazionale dei reattori⁵⁶. Questi fattori non ridurrebbero affatto la dipendenza nelle forniture dei potenziali paesi utilizzatori, e potrebbero rappresentare potenziali problemi futuri circa la sicurezza dei sistemi energetici futuri, come sta accadendo oggi per le forniture del gas russo.

⁵⁶Business dominato da un numero ristretto di società principalmente francesi, russe, cinesi e americane.

Per quanto riguarda il prezzo della materia prima, invece, analizzando i dati storici notiamo che dal 1992 la volatilità mensile del prezzo dell'uranio è stata inferiore a quella del gas naturale, ma comunque in crescita e caratterizzata da un forte shock nel biennio 2005 – 2007, dove si registrò un incremento che superò il 440%.

Figura 67: Benchmark evoluzione mensile prezzo del gas naturale e dell'uranio (gen 1992 – lug 2022)



Fonte: International Monetary Fund

Contestualizzando il trend del prezzo dell'uranio con la quasi staticità del mercato energetico nucleare degli ultimi 30 anni (caratterizzato da lievi fluttuazioni al ribasso) possiamo ipotizzare che lo stesso, in un contesto più sviluppato e dinamico, avrebbe potuto registrare molte più turbolenze legate a fattori produttivi, economici e politici, come le altre alternative fossili o metalli rari utilizzati per il fotovoltaico.

7.6.6 Le risorse limitate

A differenza di altre opzioni energetiche, l'energia nucleare non è rinnovabile e richiede l'uranio per produrre energia che non è una risorsa infinita.

Solitamente, la valutazione dell'abbondanza o della scarsità di una risorsa mineraria si basa sul rapporto tra le riserve e la produzione dell'ultimo anno. Questo fornisce un indicatore del numero di anni necessari per esaurire le riserve considerando che la produzione continui al ritmo registrato nell'ultimo anno. Prendendo come riferimento le risorse globali indicate nel "Red Book" del 2020 e confrontandole con la produzione mondiale di uranio nello stesso periodo, si stima una produzione massima garantita di circa 130 anni. Tuttavia, considerando il tasso di consumo attuale di uranio, che supera l'offerta, la prospettiva scende a circa 100 anni, una cifra inferiore ma comunque rassicurante [55]. Sebbene queste stime non suscitino particolari preoccupazioni nel breve termine, l'utilità marginale derivante da nuove prospezioni, ossia la ricerca di nuovi giacimenti di uranio, è relativamente limitata. In un

contesto di economia di mercato, una bassa domanda di uranio comporterebbe un livello ridotto di attività connesse alla filiera, compresi i servizi di prospezione e individuazione delle riserve. Ciò avverrebbe poiché queste attività aggiungerebbero ulteriori quantità di uranio a una risorsa già abbondante sul pianeta. Invece, qualora dovessero registrarsi aumenti della domanda di uranio, i professionisti della prospezione mineraria sarebbero incentivati a individuare e valorizzare le risorse per inserirle sul mercato.

E' probabile quindi che senza nuove attività di prospezione, nel corso degli anni, le riserve di uranio si esauriranno causando un aumento del prezzo della risorsa e potenziali impatti ambientali legati all'estrazione.

7.7 Il futuro del nucleare

Il futuro successo dell'energia nucleare è strettamente legato a vari fattori chiave. È imperativo affrontare le sfide tecniche e regolamentari specifiche intrinseche alla tecnologia fornendo risposte efficaci e mirate a questioni particolari legate alla progettazione, alla gestione e alla sicurezza degli impianti.

In secondo luogo, la competitività economica dell'energia nucleare rispetto alle fonti di energia rinnovabile assume un ruolo cruciale nel definire la sua posizione nel panorama energetico globale. È essenziale valutare la sostenibilità finanziaria e l'efficienza delle tecnologie nucleari rispetto alle alternative rinnovabili per garantire una scelta razionale ed equilibrata, accaparrandosi l'accettazione pubblica, un elemento fondamentale per il successo a lungo termine dell'energia nucleare. Coinvolgere attivamente la società in discussioni aperte e trasparenti sarà essenziale. Rispondere in modo adeguato e convincente alle preoccupazioni della pubblica opinione riguardo alla sicurezza, alla gestione dei rifiuti e alla proliferazione nucleare sarà cruciale per stabilire una solida base di fiducia e favorire lo sviluppo e l'adozione delle nuove tecnologie nucleari.

Al fine di poter raggiungere gli obiettivi, attualmente, il panorama energetico nucleare sta cercando di evolversi, di fatto sono in fase prototipale gli SMR (*Small Modular Reactors*), i reattori a fusione nucleare, i reattori di quarta generazione e gli AMR (*Advanced Modular Reactors*).

7.7.1 I reattori di quarta generazione

I reattori nucleari di quarta generazione rappresentano una prospettiva avanzata nella ricerca nucleare focalizzata su tecnologie innovative con l'obiettivo di superare le sfide dei reattori attuali.

Come spiega a “Linkiesta” Flavio Parozzi, presidente di “Cise2007” e consulente dell’Unione Europea in materia di energia nucleare, *«tutto è cominciato alla fine degli anni Novanta, quando i principali consorzi di costruttori e laboratori di ricerca universitari – principalmente guidati da Stati Uniti ed Europa – si sono domandati su quali progetti convogliare le ricerche di sviluppo al fine di far convergere lo sforzo di ricerca. In questo contesto furono selezionate le sei tipologie di reattori più promettenti per il futuro e che oggi chiamiamo nucleare di quarta generazione. L’obiettivo scientifico comune era quello di produrre meno scorie o addirittura bruciarle al loro interno, un altro desiderato era quello di minimizzare l’uso di combustibile, ossia l’uranio».*

Ci troviamo di fronte a un elemento che, come visto in precedenza nel presente capitolo, sebbene non sia raro in natura, potrebbe diventare strategico ridurre il consumo, specialmente considerando le prospettive del mercato futuro. Questa considerazione deriva dal fatto che, in una reazione a fissione, viene utilizzato solo l'1% di questo elemento, mentre il restante diventa combustibile esausto, ovvero scorie radioattive.

L'utilizzo del termine "quarta generazione", invece, non solo denota una successione cronologica, ma evidenzia anche un significativo avanzamento tecnologico rispetto al passato. [56] I reattori nucleari di quarta generazione, oggi, sono reattori sperimentali o dimostrativi di nuova generazione, che si basano comunque sulla reazione fisica della fissione nucleare, mediante l'utilizzo di turbine e alternatori, ma sono più efficienti e più sicuri delle generazioni precedenti. Infatti, rendendo molto più efficiente l'utilizzo del combustibile, producono meno scorie, abbattendo, di conseguenza, i costi per il combustibile stesso e per lo smaltimento degli scarti radioattivi con relativi rischi annessi.

Il tempo di sviluppo rappresenta un fattore critico, richiedendo investimenti significativi e il superamento di sfide tecniche, il che potrebbe comportare ritardi nella realizzazione su scala commerciale, come per le altre alternative innovative elencate, e più in generale per tutto l'ambito nucleare.

La realizzazione su larga scala di reattori nucleari di quarta generazione è un obiettivo a lungo termine, che potrebbe richiedere diversi decenni. Il progresso nella ricerca e nello

sviluppo potrebbe portare a sviluppi più chiari nei prossimi anni, ma è importante considerare l'incertezza e le variabili coinvolte.

Si prevedono costi elevati sia associati alla ricerca e allo sviluppo che per le future realizzazioni. I reattori di quarta generazione, possono raggiungere i 1.500 megawatt di potenza elettrica (MWe) e sono di dimensioni molto grandi, con un impatto notevolmente sulle voci di costo.

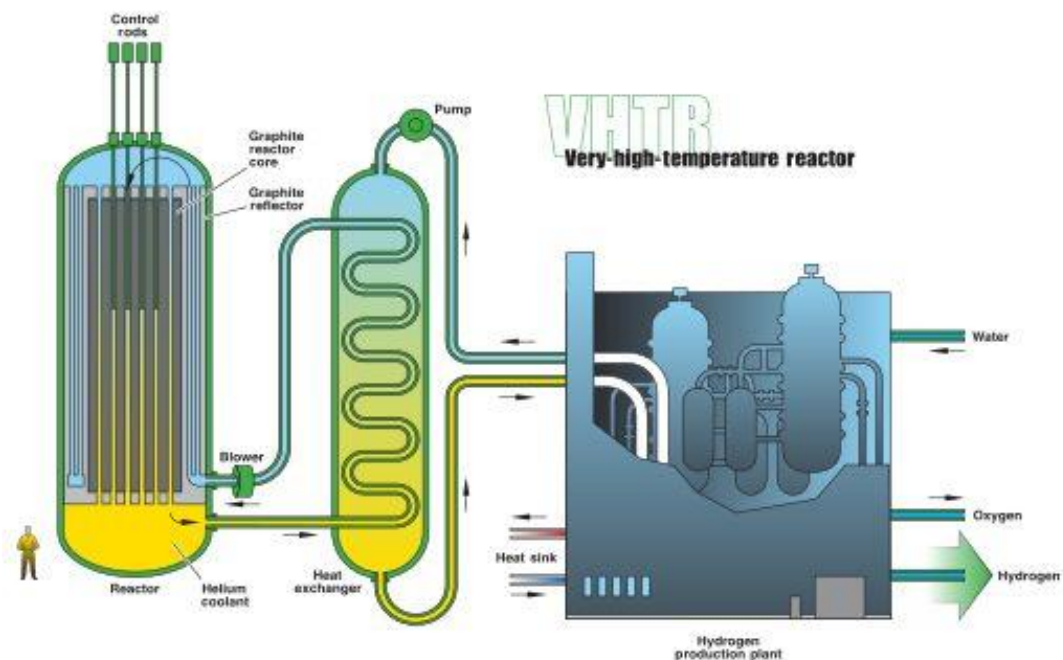
Questi reattori si dividono in due grandi categorie: quelli termici e quelli a neutroni veloci.

7.7.1.1 I reattori termici

Un primo modello di reattore termico di quarta generazione è chiamato reattore a fissione a temperatura molto alta (*Very High Temperature Reactor, VHTR*).

Al suo interno si raggiungono temperature prossime dei 1000 °C e, per controllare la reazione, si usa la grafite come moderatore. Per raffreddare invece si usano elio o sali fusi. L'uranio viene usato a ciclo singolo (anche detto aperto), ovvero la reazione di fissione avviene in un unico passaggio e il calore generato viene scambiato in uno scambiatore termico.

Figura 68: I reattori nucleari termici di quarta generazione VHTR

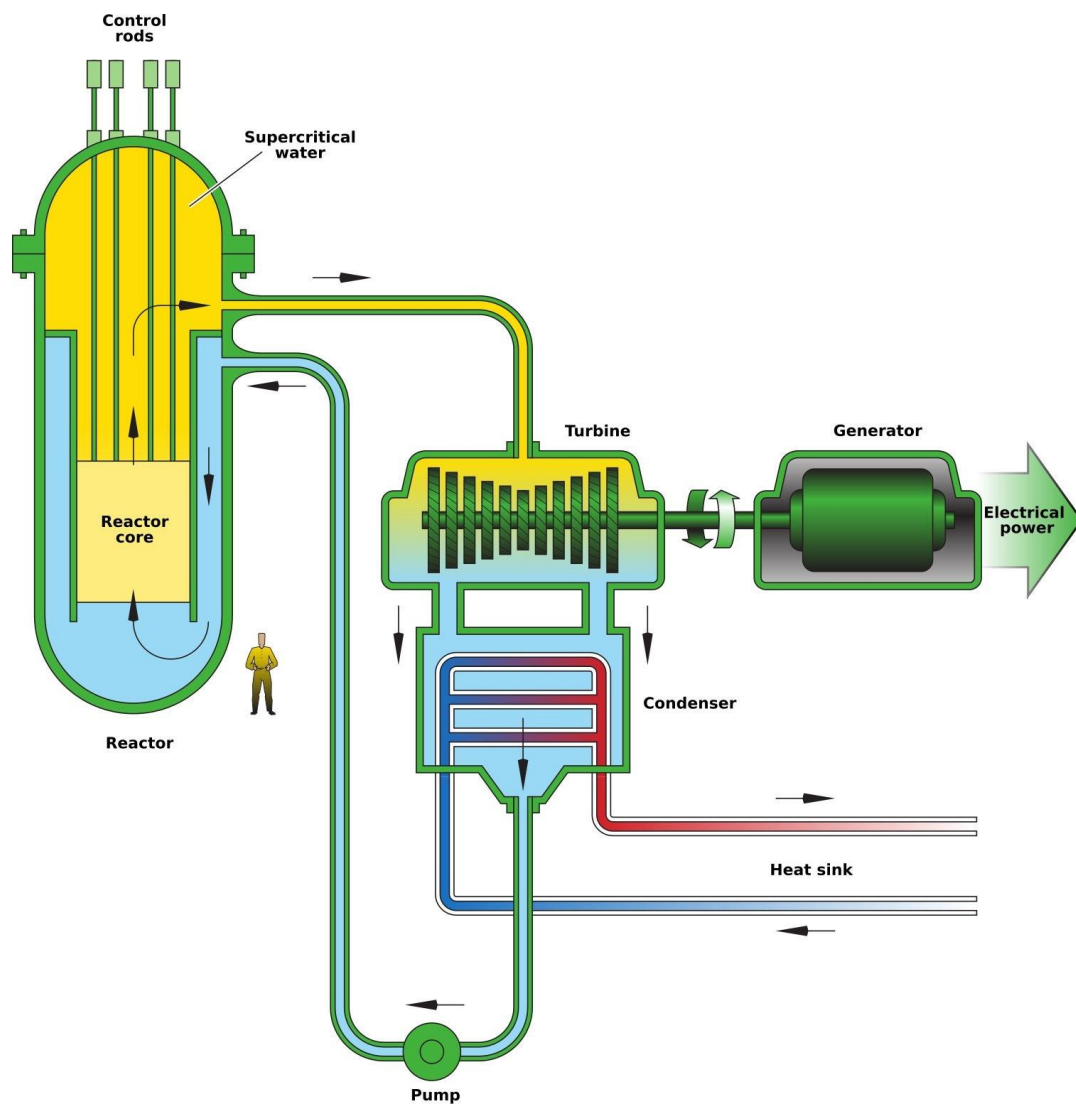


Fonte: Geopop [57]

Esistono poi i reattori nucleari a sali fusi (*Molten Salt Reactor*, MSR), che sfruttano cicli chiusi e come refrigerante, appunto, i sali fusi di fluoruro. Il combustibile spesso è dissolto nel refrigerante e la temperatura operativa del nocciolo può raggiungere gli 800 °C.

Tra i reattori termici, esistono anche i SCWR (*Supercritical-Water-Cooled Reactor*). Questi impianti utilizzano acqua supercritica per raffreddare, ovvero acqua a pressione e temperatura elevate (superiori a 22,1 MPa e 374 °C) in cui fase liquida e gassosa non esistono più separatamente. Si raggiungono temperature più ridotte rispetto ai due impianti precedenti, attestandosi attorno ai 600 °C.

Figura 69: I reattori nucleari termici di quarta generazione SCWR



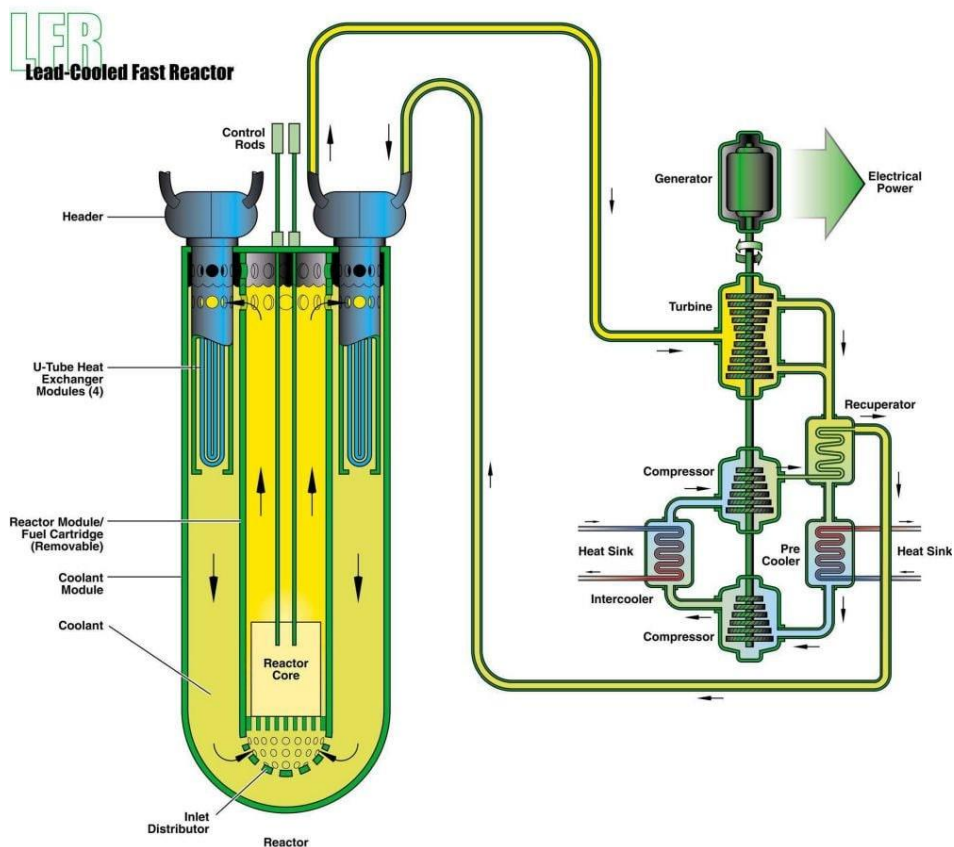
Fonte: Geopop [57]

7.7.1.2 I reattori a neutroni veloci

I reattori a neutroni veloci sono reattori che non prevedono un moderatore, ovvero quell'elemento di controllo della reazione: di conseguenza non rallentano i neutroni prodotti e sfruttano anche quelli veloci. Sono tutti impianti a ciclo chiuso, ma si differenziano per il tipo di fluido di raffreddamento. Un esempio è il reattore nucleare a neutroni veloci refrigerato a gas (*Gas-cooled Fast Reactor*, GFR). Questo impianto sfrutta l'elio come refrigerante e in uscita si possono raggiungere temperature attorno agli 850 °C.

Esiste poi il reattore nucleare a neutroni veloci refrigerato a sodio (*Sodium-cooled Fast Reactor*, SFR). In questo tipo di impianti il raffreddamento è fatto con sodio e le temperature superano di poco i 500°C. Infine, c'è il reattore nucleare a neutroni veloci refrigerato a piombo (*Lead-cooled Fast Reactor*, LFR). In questo caso si usa piombo liquido o una miscela che lo contiene, come quella bismuto/piombo. Questa miscela ha la particolarità di essere eutettica, ovvero caratterizzata da una temperatura di fusione inferiore a quella di fusione dei singoli elementi che la compongono. Anche in questo caso la temperatura del nocciolo può raggiungere gli 800 °C.

Figura 70: I reattori nucleari a neutroni veloci di quarta generazione LFR



Fonte: Geopop [57]

7.7.2 *Gli Small Modular Reactors - SMR*

Gli *Small Modular Reactors* (SMR) rappresentano una nuova frontiera nell'evoluzione dell'energia nucleare poiché caratterizzati da modularità e dimensioni ridotte in grado di generare al massimo 300 megawatt di potenza elettrica (MWe). Sono la versione ridotta dei reattori di quarta generazione. Questi sfruttano il processo di fissione nucleare impiegando la scissione di atomi pesanti come l'uranio-235 per generare energia elettrica e calore ad alta temperatura per usi civili e industriali (addirittura alcuni progetti prevedono l'utilizzo dell'uranio-238, molto più diffuso e facile da estrarre). Gli SMR risultano essere anche molto versatili poiché ideati per implementare diverse tipologie di reattori a fissione come i reattori termici, quelli a neutroni veloci, quelli raffreddati a gas e quelli a sali fusi. [58]

La costruzione e l'assemblaggio dei moduli avviene in azienda e non più sul sito nucleare, permettendo l'utilizzo di un design comune per diversi reattori e/o progetti. Ciò riduce i costi e il tempo di costruzione⁵⁷ grazie alle economie di scala e di apprendimento e, di conseguenza, i rischi finanziari.

Dal punto di vista economico, le stime attuali dei costi dell'energia (LCOE) per gli SMR oscillano tra 45 e 110 USD/MWh, con l'obiettivo di ridurli a 40-60 USD/MWh a regime. La solidificazione della tecnologia posizionerebbe gli SMR tra le forme di energia dispacciabile a basso impatto ambientale più competitive in termini di costo.

Gli SMR, inoltre, sono stati concepiti per essere installati anche sotto terra, al fine di ridurre il rischio in situazioni di emergenza o in aree remote⁵⁸, offrendo una soluzione ideale per bilanciare la potenza richiesta da fonti rinnovabili intermittenti o per sostituire impianti che attualmente impiegano combustibili fossili per la produzione di energia, sfruttando reti e infrastrutture già presenti. [48]

Ulteriori vantaggi significativi rappresentati da nuovi reattori modulari sono la flessibilità di produzione sia di energia elettrica che termica (cogenerazione), l'estesa durata del "combustibile" nucleare fino a 25 anni, gli elevati sistemi di sicurezza passivi previsti e l'assenza di emissioni dirette di CO_2 .

⁵⁷ Riduzioni stimate fino al 40% rispetto a quelle dei reattori nucleari tradizionali. [48]

⁵⁸ Il Korean Atomic Energy Research Institute (KAERI) e Samsung Heavy Industries hanno siglato un accordo per la ricerca e lo sviluppo di piccoli reattori modulari (SMR) per la propulsione navale e per la produzione di energia nucleare off-shore. [65]

In aggiunta, peculiarità importantissima in tema sicurezza, è che i reattori modulari non avranno necessità di energia elettrica ausiliaria o di intervento umano, riducendo notevolmente eventuali disagi causati alla rete elettrica esistente ed esposizioni a campi radioattivi prolungate degli operatori.

Tuttavia, occorre affrontare sfide condivise con le tipologie di reattori oggi esistenti, quali la gestione delle scorie, il rischio di disastri ambientali e la vulnerabilità dei sistemi passivi in caso di inondazioni.

L'entrata in funzione dei primi SMR è prevista entro il 2030⁵⁹, promuovendo una visione innovativa dell'energia nucleare in grado di superare le sfide tradizionali e contribuendo a un futuro energetico più sostenibile.

7.7.3 *Gli Advanced Modular Reactor – AMR*

Sviluppati in parallelo alla quarta generazione da partnership internazionali composte prevalentemente da attori privati, i reattori AMR, noti anche come ADS (*Accelerator Driven System*, letteralmente 'sistemi guidati da un acceleratore') dovrebbero essere realizzati entro il 2030. In questo approccio il funzionamento del reattore dipende dai neutroni prodotti esternamente da un acceleratore di protoni.

La sicurezza di questo sistema è notevolmente migliorata, poiché in caso di black out elettrico, l'evento più rischioso per una centrale nucleare, l'acceleratore cessa l'attività e il reattore, privo dei neutroni essenziali, si spegne. L'innovazione chiave nei modelli più promettenti degli AMR, così come i reattori della quarta generazione è rappresentata dal refrigerante a metallo liquido, che consente l'uso di uranio naturale come combustibile. Nei reattori raffreddati al piombo liquido, la temperatura di smaltimento del calore è notevolmente elevata, consentendo l'utilizzo di questo calore residuo per altri usi, tra cui la generazione di idrogeno, uno dei più promettenti vettori energetici del futuro, o per il teleriscaldamento. Ciò rende l'uso del calore derivante dalla fissione nucleare più efficiente, evidenziando un'ulteriore prospettiva innovativa nella ricerca e nello sviluppo dei reattori avanzati. Anche in questo caso i tempi per la commercializzazione sono incerti e i costi altrettanto elevati. [59]

⁵⁹ Dichiarazione della società russa Rosatom Overseas circa la messa in funzione del reattore modulare di Ust-Kuyga (estremo oriente della Russia) da 55 MWe progettato per la sola produzione di energia elettrica. [48]

7.7.4 I reattori a fusione nucleare

I reattori a fusione nucleare rappresentano una frontiera avanzata nella ricerca energetica ed hanno l'obiettivo di emulare il processo che alimenta il sole attraverso la fusione nucleare, dove quattro nuclei di idrogeno si fondono a temperature dell'ordine dei milioni di gradi Kelvin, producendo un nucleo di elio e rilasciando una considerevole quantità di energia. Tale processo, quindi, prevede la fusione di due nuclei atomici in uno ed il rilascio di neutroni.

L'energia generata dal processo di fusione si basa sulla teoria della relatività di Einstein $E=mc^2$, la quale stabilisce che se un corpo emette un'energia E sotto forma di radiazione, la sua massa m diminuisce di una quantità pari a E/c^2 , quindi massa ed energia possono trasformarsi l'una nell'altra.

Nonostante progetti come ITER, in Francia⁶⁰ stiano cercando di realizzare questa visione da anni, la data di realizzazione commerciale su larga scala rimane incerta a causa delle complesse sfide scientifiche ed ingegneristiche.

L'obiettivo più prossimo dell'esperimento, previsto entro il 2027, è mantenere la fusione in modo stabile per 60 minuti. In caso di successo, ITER sarà seguito da DEMO (*DEMONstration Power Plant*), un secondo progetto che mira a realizzare il primo reattore commerciale entro il 2050. [41]

Tra i vantaggi principali dei reattori a fusione figura l'abbondanza di combustibile, utilizzando isotopi leggeri di idrogeno, e la sicurezza intrinseca, con un basso rischio di incidenti catastrofici. Inoltre, la produzione ridotta di rifiuti radioattivi, con una vita più breve, rappresenta un altro punto a loro favore. Fa eccezione il nocciolo del reattore in quanto a radiazioni e rifiuti pericolosi che, gradualmente irradiato dai neutroni prodotti dalla fusione, deve essere stoccato in modo sicuro alla fine della sua vita operativa.

Tuttavia, le complessità tecniche legate alla gestione di temperature estremamente elevate e al controllo del plasma⁶¹ rappresentano sfide significative. La fusione controllata richiede la confinazione del plasma, ovvero una miscela di isotopi dell'idrogeno come il deuterio e il

⁶⁰ Il progetto internazionale ITER coinvolge l'Unione Europea insieme a Russia e Cina e, attualmente, prevede la costruzione del primo reattore sperimentale a confinamento magnetico a Cadarache, nel sud della Francia.

⁶¹ A temperature molto alte le singole particelle di un gas tendono a dissociarsi negli elementi costitutivi (ioni ed elettroni) e il gas si trasforma in una miscela di particelle cariche, cioè un plasma che è il principale costituente delle stelle e del sole.

trizio ad altissime temperature per innescare la reazione, mediante campi magnetici (o raggi laser). Fino a oggi, l'umanità è riuscita a replicare questo processo solo in modo disgregante nelle bombe all'idrogeno.

I ritardi tecnici fin ora registrati erano attesi, visto l'alto livello innovativo, rendendo difficile stabilire una data precisa di realizzazione. Il costo associato allo sviluppo e alla costruzione degli impianti di fusione potrebbe essere tra i più alti in assoluto tra le varianti del “nuovo nucleare”, rappresentando un ostacolo significativo alla loro implementazione su larga scala. Nonostante le incertezze, se queste sfide saranno affrontate con successo, i reattori a fusione potrebbero offrire una fonte di energia pulita, relativamente sicura e, soprattutto, sostenibile nel panorama energetico del futuro.

7.7.5 I diversi ambiti di applicazione del nucleare

L'energia nucleare, pur essendo spesso al centro di dibattiti controversi, mostra un potenziale significativo al di là della sua tradizionale applicazione nella produzione di elettricità. Mentre la Neutralità Climatica (NZE), attualmente, sembra orientarsi maggiormente verso alternative come la produzione di idrogeno tramite gas naturale con cattura e stoccaggio del carbonio (CCUS) o mediante elettrolisi alimentata da fonti rinnovabili, è importante esplorare ulteriormente il ruolo che il nucleare può svolgere in altri settori.

In ambito medico, ad esempio, l'energia nucleare riveste un ruolo cruciale attraverso la produzione di radiofarmaci utilizzati in medicina nucleare. Questi consentono diagnosi più precise e trattamenti avanzati, contribuendo significativamente alla cura delle malattie. L'applicazione del nucleare in questo contesto riflette una sinergia tra progresso scientifico ed energia nucleare, dimostrando il suo impatto positivo sulla salute umana.

Oltre che nel settore dei trasporti, in particolare per l'aviazione e per il trasporto marittimo, la propulsione nucleare nello spazio rappresenta un'altra frontiera innovativa. L'utilizzo di motori nucleari offrirebbe infatti una soluzione più efficiente per missioni spaziali a lungo termine, aprendo possibilità esplorative nell'universo e accelerando l'avanzamento delle tecnologie spaziali.

Anche nel contesto industriale e agricolo, la produzione di isotopi radioattivi tramite irraggiamento nucleare potrebbe ricoprire ruoli essenziali per diverse applicazioni. Ad

esempio la sterilizzazione di dispositivi medici⁶² e degli alimenti⁶³ attraverso isotopi radioattivi contribuirebbe a migliorare la sicurezza sanitaria, mentre l'utilizzo di isotopi nell'ottimizzazione delle pratiche agricole a una gestione più sostenibile delle risorse alimentari⁶⁴.

I reattori di ricerca offrono un ambiente sicuro per l'acquisizione di competenze pratiche, preparando una nuova generazione di professionisti in grado di affrontare sfide complesse legate all'energia nucleare e alle sue molteplici applicazioni.

L'energia nucleare, se gestita in modo responsabile e con un'attenzione adeguata alla sicurezza, può emergere come un attore chiave in diversi settori, dalla produzione di idrogeno alla medicina, dall'esplorazione spaziale all'industria e all'agricoltura. Questa diversificazione degli impieghi potrebbe contribuire a plasmare un futuro energetico più sostenibile, avanzato e ad incentivare maggiormente le figure coinvolte nel sostenere lo sviluppo della tecnologia nucleare.

⁶² In medicina, ad esempio, gli isotopi radioattivi come il cobalto-60 possono essere impiegati per sterilizzare strumenti medici complessi e dispositivi monouso. I raggi gamma emessi durante il processo di irraggiamento distruggono batteri, virus e altri microrganismi presenti sugli strumenti, garantendo una sterilizzazione efficace e contribuendo a prevenire infezioni nosocomiali.

⁶³ Gli isotopi radioattivi possono essere utilizzati per irradiare alimenti, come le spezie o le erbe aromatiche. Ad esempio, l'irraggiamento con cobalto-60 può eliminare batteri patogeni e parassiti presenti negli alimenti senza alterarne significativamente il sapore o le proprietà nutrizionali.

⁶⁴ Gli isotopi radioattivi come l'azoto-15 possono essere utilizzati per tracciare il movimento dei nutrienti nel terreno e nelle piante. Questo permette agli agricoltori di ottimizzare la gestione delle risorse, applicando fertilizzanti in modo mirato e riducendo gli sprechi.

CONCLUSIONE

Il presente lavoro ha approfondito la cruciale necessità di intraprendere una transizione energetica rapida ed efficace al fine di mitigare i danni ambientali e raggiungere la tanto ambita, quanto necessaria, neutralità climatica. Emerge con chiarezza che la transizione comporterà sforzi importantissimi sia in termini economici che in termini comportamentali.

Per quanto riguarda la prima voce citata, sarà fondamentale sostenere in ogni modo lo sviluppo delle fonti a basso impatto ambientale, seppur dispendiose in questa fase di transizione, a discapito delle fonti fossili o comunque inquinanti. Del resto tali investimenti sono volti a migliorare la vita di tutti gli esseri umani, oltre che dell'ecosistema che ci ospita, e a mitigare il costo dei cambiamenti climatici la cui stima attuale supera i 143 miliardi di dollari l'anno,⁶⁵ sottolineando l'urgenza di una transizione energetica a qualunque costo. [18] Questa transizione non rappresenta solo una necessità ambientale, ma anche un'imperativa economica. Investire in nuove tecnologie, come batterie avanzate e reti intelligenti, oltre che incentivare lo sviluppo e l'evoluzione delle tecnologie esistenti, come il nucleare, è fondamentale per generare e gestire energia pulita in modo efficiente, riducendo al contempo i costi a lungo termine legati ai danni ambientali e alla salute. In questo contesto sarà fondamentale analizzare adeguatamente la giusta valorizzazione del costo delle emissioni del carbonio affinché funga da incentivo fondamentale per la produzione di energia e per i processi produttivi puliti. Di fatto, un forte apprezzamento del costo delle emissioni, renderebbe decisamente meno competitive le risorse fossili in tutti i contesti, produttivi e non, riducendo il divario di costo con gli approvvigionamenti energetici da fonti a basso (o nullo) impatto ambientale. In questo scenario, anche l'energia nucleare di nuova generazione potrebbe risultare molto più competitiva, seppur con costi importanti. Il nucleare, nonostante le tante criticità, risulta essere un tassello fondamentale nel panorama energetico mondiale.

⁶⁵ Ilan Noy, professore della Victoria University of Wellington in Nuova Zelanda e coautore dello studio, ha spiegato che l'importo potrebbe essere ancora più alto: la stima, infatti, considera solo i danni diretti, ma per molti eventi meteorologici estremi non ci sono cifre precise sul numero di persone uccise o sui danni economici. [18]

Oggi, la transizione è imprescindibile dal suo contributo per tutti i vantaggi descritti nei capitoli precedenti, in primis la stabilità che offre al sistema energetico. Stando allo sviluppo tecnologico attuale sarà inevitabile prorogare la vita utile di tutti gli impianti già esistenti e promuovere la costruzione di nuove centrali al fine di garantire l'energia dispacciabile richiesta almeno dal carico base delle reti future. Lo sviluppo delle tecnologie per l'accumulo dell'energia prodotta dalle fonti intermittenti, tra le alternative più papabili in alternativa al nucleare, oltre che ugualmente dispendiose, risultano anch'esse acerbe. Per agevolare lo sviluppo del nucleare, sarà altresì fondamentale garantire standard di sicurezza adeguati in tutta la filiera, rendere più snelle le procedure burocratiche, ma, soprattutto, informare adeguatamente e costantemente, in trasparenza, circa i reali processi produttivi, i rischi e la gestione delle scorie.

La seconda voce invece, ovvero i comportamenti, ricopre un altro tassello fondamentale, che guiderà la transizione. Non sarà sufficiente sviluppare nuove tecnologie, se queste non vengono apprezzate dal mercato ed utilizzate in modo consono e coscienzioso. I cambiamenti comportamentali dovranno essere il pivot della riduzione dei consumi e quindi della domanda di energia. Ai cambiamenti comportamentali, l'IEA, nello scenario NZE, attribuisce una riduzione dell'utilizzo delle tecnologie a emissioni negative di circa un terzo, evitando 820 Mt di CO_2 entro il 2050. [32] L'adozione di pratiche più sostenibili da parte dei consumatori è un elemento chiave nella riduzione complessiva dell'impatto ambientale e deve essere incoraggiata attraverso politiche e programmi educativi, favorite da adeguate infrastrutture⁶⁶ messe a disposizione degli utilizzatori finali.

Agli stessi consumatori dovranno essere garantiti sostegni per gli investimenti in fonti meno inquinanti e la certezza che l'intero costo della transizione non ricada interamente su di loro. Un altro aspetto cruciale che la transizione energetica dovrà garantire, in aggiunta a limitare i danni ambientali, sarà creare nuove opportunità di lavoro, oltre che assorbire “gli organici” attualmente impiegati nelle varie filiere dei combustibili fossili. La valorizzazione della forza lavoro impiegata nei settori delle fonti combustibili è essenziale, promuovendo una transizione equa e inclusiva.

⁶⁶ Ad esempio devono essere disincentivati viaggi aerei per distanze medio corte, favorendo il trasporto ferroviario; devono essere incentivati i consumi elettrici di energia nei momenti di picco di carico del sistema elettrico, specialmente quelli degli usi civili, sviluppare reti elettriche intelligenti, etc...

Concludendo, la cooperazione internazionale si rivela indispensabile per raggiungere gli obiettivi prefissati. La lotta contro i cambiamenti climatici richiede un impegno condiviso, coinvolgendo paesi ricchi e poveri. È doveroso garantire che i paesi meno sviluppati ricevano il supporto necessario, sia in termini finanziari che tecnologici, per partecipare attivamente alla causa ambientale. Solo attraverso una collaborazione globale possiamo sperare di affrontare con successo le sfide ambientali e garantire uno sviluppo sostenibile per tutti, mettendo da parte gli interessi meramente economici di cui al mondo ne beneficiano davvero in pochi.

A tal proposito, la conclusione della “Cop28”, la Conferenza delle parti sul clima delle Nazioni Unite tenutasi a Dubai dal 30 novembre al 13 dicembre 2023, lascia ben sperare che qualcosa stia cambiando. Difatti per la prima volta è stato redatto e approvato il testo finale che contiene l'accordo sul *global stocktake*, cioè il primo “tagliando” sugli impegni presi dai Paesi che hanno sottoscritto l'accordo di Parigi siglato nel 2015 per ridurre le emissioni e contenere l'aumento delle temperature entro 1,5 gradi rispetto al periodo pre-industriale.

Il segnale più forte e inaspettato, per quanto debole, vista la mancanza di linee guida e obiettivi prefissati, che potrebbe sancire l'inizio della fine dell'era dei combustibili è stata la comparsa per la prima volta della parole “*fossil fuels*” all'interno di un testo finale. Infatti, l'articolo su cui si è concentrata l'attenzione è il n. 28, nel quale si parla di transizione in uscita dalle fonti fossili nei sistemi energetici, in un modo ordinato ed equo, accelerando l'azione in questo decennio critico, per raggiungere le emissioni zero nel 2050 seguendo la scienza. Importante pietra miliare raggiunta in un contesto internazionale, inclusivo dei principali esportatori mondiali di petrolio, quali Emirati e Arabia Saudita. All'interno del medesimo testo sono stati citati anche importanti *step* da perseguire con forza, quali la necessità di triplicare le rinnovabili e duplicare l'efficienza energetica entro il 2030, la riduzione dell'utilizzo del gas metano, accelerare l'adozione di nuove tecnologie, incluso il ricorso all'atomo e l'abbattimento delle emissioni serra tramite la cattura del carbonio e lo sforzo di proseguire nella transizione giusta, senza lasciare nessun Paese indietro (“Nessun passo differenziato”) [60].

Nonostante gli argomenti trattati nell'incontro internazionale lascino ben sperare, l'aver enfatizzato all'inverosimile la “transizione” attraverso la poca chiarezza dei contenuti e degli obiettivi approssimativi condivisi, a mio avviso, non ha trasmesso serenità e certezza circa il da farsi. Siamo in ritardo per il clima e per la vita di miliardi di persone.

BIBLIOGRAFIA

Fonti

- [1] Rinnovabili.it, «IEA: siamo nella “prima vera crisi energetica globale”,» Rinnovabili.it, 25 Ottobre 2022. [Online]. Available: <https://www.rinnovabili.it/energia/politiche-energetiche/iea-siamo-nella-prima-vera-crisi-energetica-globale/>. [Consultato il giorno 10 Settembre 2023].
- [2] IEA, «La Crisi Energetica Globale,» IEA, 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/topics/global-energy-crisis?language=it>. [Consultato il giorno 5 Settembre 2023].
- [3] D. Gandini, «La crisi petrolifera del 1973. Le domeniche a piedi e il prezzo del petrolio alle stelle,» euronews.com, 14 Ottobre 2022. [Online]. Available: <https://it.euronews.com/2022/10/14/la-crisi-petrolifera-del-1973-le-domeniche-a-piedi-e-il-prezzo-del-petrolio-alle-stelle>. [Consultato il giorno 3 Settembre 2023].
- [4] F. Marcello, «La crisi del 1973,» *Novecento.org*, n. 2, 2014.
- [5] A. Clò, «Crolla il greggio, tra coronavirus e guerra dei prezzi,» *Rivistaenergia.it*, 9 Marzo 2020. [Online]. Available: <https://www.rivistaenergia.it/2020/03/crollo-del-greggio-tra-coronavirus-e-guerra-dei-prezzi/>. [Consultato il giorno 14 Settembre 2023].
- [6] A. Beloli, «Guerra in Ucraina, i motivi del conflitto con la Russia e gli eventi dietro la crisi in corso,» *Geopop*, 14 Febbraio 2022. [Online]. Available: <https://www.geopop.it/cosa-sta-succedendo-tra-ucraina-e-russia-i-motivi-e-gli-eventi-dietro-alla-crisi-in-corso/>. [Consultato il giorno 11 Settembre 2023].

- [7] I. Nicoletti, «Gli Stati cuscinetto in Geopolitica,» M.I. GEO, 18 Luglio 2023. [Online]. Available: <https://mondointernazionale.org/focus-allegati/gli-stati-cuscinetto-in-geopolitica>. [Consultato il giorno 11 Settembre 2023].
- [8] Eticaeconomia.it, «GUERRA IN UCRAINA E CRISI ENERGETICA: VERSO UN RITORNO DELLO STATO?,» Eticaeconomia.it, 14 Gennaio 2023. [Online]. Available: <https://eticaeconomia.it/guerra-in-ucraina-e-crisi-energetica-verso-un-ritorno-dello-stato/>. [Consultato il giorno 17 Settembre 2023].
- [9] A. Clerici, «L'Energia nel Mondo dopo la Pandemia. Riflessioni sugli Impegni UE dell'Itali,» L'astrolabio, 13 Marzo 2023. [Online]. Available: <https://astrolabio.amicidellaterra.it/node/2908#:~:text=L'energia%20%C3%A8%20stata%20ed,ecologica%2Fambientale%20sempre%20pi%C3%B9%20stretto..> [Consultato il giorno 20 Settembre 2023].
- [10] Luca.P, «Consumo di energia primaria per fonte nell'Unione Europea e nel mondo (1965-2022),» grafici.altervista.org, 30 Agosto 2023. [Online]. Available: <https://grafici.altervista.org/consumo-di-energia-primaria-per-fonte-nellunione-europea-e-nel-mondo/>. [Consultato il giorno 10 Settembre 2023].
- [11] Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica, «LA SITUAZIONE ENERGETICA NAZIONALE NEL 2022,» Ministero dell'ambiente e della sicurezza energetica, Roma, Luglio 2023.
- [12] O. Carlini, «Effetto serra: che cos'è e come ridurlo,» Xclimate.net, [Online]. Available: <https://www.xclimate.net/blog/effetto-serra-cose/#:~:text=Alcuni%20gas%20atmosferici%20come%20l,media%20di%2015%20gradi%20Celsius..>
- [13] Scienceaq, «Importanza dell'atmosfera terrestre,» [Online]. Available: <http://it.scienceaq.com/Nature/100217118.html>. [Consultato il giorno 1 Settembre 2023].

- [14] L. F. PAOLINI, «Gas serra: quali sono e come sono emessi,» Duegradi, 29 Aprile 2020. [Online]. Available: <https://www.duegradi.eu/news/gas-serra/>. [Consultato il giorno 1 Ottobre 2023].
- [15] V. Silvonen, «I gas effetto serra e i loro effetti nocivi,» Genano.com, [Online]. Available: <https://www.genano.com/it/infobase/i-gas-effetto-serra-e-i-loro-effetti-nocivi>. [Consultato il giorno 14 Settembre 2023].
- [16] Fondazione myclimate, «Cosa sono le CO₂ equivalenti?,» Fondazione myclimate, [Online]. Available: [https://www.myclimate.org/it-ch/informarsi/dettaglio-faq/cosa-sono-le-co2-equivalenti/#:~:text=Le%20CO%E2%82%82%20equivalenti%20\(CO%E2%82%82e\)%20sono,e%20il%20protossido%20di%20azoto](https://www.myclimate.org/it-ch/informarsi/dettaglio-faq/cosa-sono-le-co2-equivalenti/#:~:text=Le%20CO%E2%82%82%20equivalenti%20(CO%E2%82%82e)%20sono,e%20il%20protossido%20di%20azoto). [Consultato il giorno 30 Agosto 2023].
- [17] IPCC, «AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023,» IPCC — Intergovernmental Panel on Climate Change, 19 Marzo 2023. [Online]. Available: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. [Consultato il giorno 30 Novembre 2023].
- [18] F. Gonzalez, «La crisi del clima ci costa 135 miliardi di euro all'anno,» Wired.it, 21 Ottobre 2023. [Online]. Available: <https://www.wired.it/article/clima-crisi-costostudio/>. [Consultato il giorno 30 Novembre 2023].
- [19] E. Institute, «Statistical Review of World Energy,» 2022.
- [20] C. Europea, «I finanziamenti e il green deal,» [Online]. Available: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/finance-and-green-deal_it.
- [21] Enel, «Il Green Deal Europeo: come i 27 Paesi UE si preparano all'appuntamento con il 2050,» Enel, 17 Aprile 2023. [Online]. Available: <https://www.enel.com/it/azienda/storie/articles/2023/04/green-deal-europeo>. [Consultato il giorno 2 Settembre 2023].

- [22] Ecomondo, «Rigenerazione ambientale nel Green Deal Europeo,» Ecomondo, 20 Aprile 2022. [Online]. Available: <https://www.ecomondo.com/blog/20307263/rigenerazione-ambientale-green-deal-europeo>. [Consultato il giorno 23 Settembre 2023].
- [23] Commissione Europea, «Comunicazione della commissione : Un pianeta pulito per tutti,» Parlamento Europeo, 18 Novembre 2018. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [24] Parlamento Europeo, «Ridurre le emissioni di anidride carbonica: obiettivi e politiche dell'UE,» 27 Ottobre 2023. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20180305STO99003/ridurre-le-emissioni-di-anidride-carbonica-obiettivi-e-azioni-dell>. [Consultato il giorno 21 Novembre 2023].
- [25] Consiglio dell'Unione Europea, «Green Deal europeo,» Consiglio Europeo, [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/green-deal/#:~:text=garantire%20una%20transizione%20giusta%20e,globale%20controllo%20i%20cambiamenti%20climatici>. [Consultato il giorno 21 Ottobre 2023].
- [26] Consiglio dell'Unione Europea, «Un piano per la ripresa dell'Europa,» Consiglio dell'Unione Europea, 2023. [Online]. Available: <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/eu-recovery-plan/#:~:text=Gli%20importi%20a%20titolo%20di,Europa%3A%205%20miliardi%20di%20EUR>. [Consultato il giorno 18 Ottobre 2023].
- [27] IEA, «At IEA Ministerial Meeting, global energy leaders vow to strengthen energy security and accelerate clean energy transitions,» IEA, 24 Marzo 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/news/at-iea-ministerial-meeting-global-energy-leaders-vow-to-strengthen-energy-security-and-accelerate-clean-energy-transitions>. [Consultato il giorno 21 Ottobre 2023].
- [28] IEA, «World Energy Outlook 2023 (WEO),» 2023.

- [29] Rinnovabili.it, «World Energy Outlook IEA: il sistema energetico sta già cambiando,» Rinnovabili.it, 23 Ottobre 2023. [Online]. Available: <https://www.rinnovabili.it/energia/politiche-energetiche/world-energy-outlook-iea-sistema-energetico/>. [Consultato il giorno 18 Novembre 2023].
- [30] JPMorgan, «Scenari climatici,» 2022.
- [31] D. Oddone, «La popolazione mondiale supera gli 8 miliardi di persone: l'Editoriale del Segretario-Generale sul Giornale San Marino,» ONU - Nazioni Unite, 16 Novembre 2022. [Online]. Available: <https://unric.org/it/onu-la-popolazione-mondiale-supera-gli-8-miliardi-di-persone-leditoriale-del-segretario-generale-sul-giornale-san-marino/>. [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [32] IEA, «Net Zero Roadmap A Global Pathway to Keep the 1.5 °C Goal in Reach,» settembre 2023.
- [33] Agenzia Di Stampa Giovanile, «COP 28: “Unabated coal”, cosa vuol dire e perché usare questa parola?,» Agenzia Di Stampa Giovanile, 2 Dicembre 2023. [Online]. Available: <http://www.stampagiovanile.it/cop28/unabated-coal-cosa-vuol-dire-e-perche-usare-questa-parola/>. [Consultato il giorno 3 Dicembre 2023].
- [34] IEA, «Changes in total energy supply by source in the Net Zero Scenario, 2022–2050,» IEA, 21 Settembre 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/changes-in-total-energy-supply-by-source-in-the-net-zero-scenario-2022-2050>. [Consultato il giorno 15 Ottobre 2023].
- [35] IEA, «Gross emissions and removals, and net emissions in advanced economies in the Net Zero Scenario, 2010-2050,» IEA, 26 Settembre 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/gross-emissions-and-removals-and-net-emissions-in-advanced-economies-in-the-net-zero-scenario-2010-2050>. [Consultato il giorno 16 Ottobre 2023].

- [36] IEA, «Gross emissions and removals, and net emissions in the emerging and developing economies in the Net Zero Scenario, 2010-2050,» IEA, 26 Settembre 2023. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/gross-emissions-and-removals-and-net-emissions-in-the-emerging-and-developing-economies-in-the-net-zero-scenario-2010-2050>. [Consultato il giorno 16 Ottobre 2023].
- [37] Ecoage, «Storia del nucleare,» [Online]. Available: <https://www.ecoage.it/storia-del-nucleare.htm>. [Consultato il giorno 14 Novembre 2023].
- [38] Energit, «DOVE FU COSTRUITA LA PRIMA CENTRALE NUCLEARE AL MONDO?,» 10 Ottobre 2022. [Online]. Available: <https://energit.it/dove-fu-costruita-la-prima-centrale-nucleare-al-mondo/>. [Consultato il giorno 2023 Novembre 2023].
- [39] L. L. Strauss, Interviewee, *Speech to the National Association of Science Writers*. [Intervista]. 16 Settembre 1954.
- [40] P. -. IAEA, «Rapporti sullo stato in esercizio o esercizio sospeso,» 11 12 2023. [Online]. Available: <https://pris.iaea.org/PRIS/WorldStatistics/OperationalReactorsByCountry.aspx>. [Consultato il giorno 11 12 2023].
- [41] G. C. F. Piglione, «Sistemi Elettrici Industriali – Parte II,» in *Macchine e impianti elettrici*, Torino, 2022/2023, pp. 47 - 48.
- [42] OECD, «Energy and Climate Policy: Bending the Technological Trajectory,» in *OECD Studies on Environmental Innovation*, Parigi, OECD Publishing.
- [43] IEA, «World Energy Outlook 2020,» 2020.
- [44] I. N. Kessides, «Alimentare lo sviluppo sostenibile dell’Africa: il ruolo potenziale dell’energia nucleare,» *Science direct*, 2013.
- [45] World Nuclear Association, «Nuclear Power in Ukraine,» [Online]. Available: <https://world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-t-z/ukraine.aspx#:~:text=Ukraine>. [Consultato il giorno 2023 novembre 17].

- [46] S. Gandelli, «Geopop,» 22 Ottobre 2022. [Online]. Available: Il nucleare emerge come una fonte energetica vantaggiosa quando si considera la sua efficienza nell'occupare spazio rispetto ad altre fonti. Secondo i dati del Dipartimento dell'Energia americano, un impianto nucleare richiede un'area almeno 360 volte inf. [Consultato il giorno 17 Novembre 2023].
- [47] S. A. Anna Davidson, «The Role of Nuclear Energy,» OIES-Aramco Fellow, OIES, 2022.
- [48] IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, «Nuclear Power and Secure Energy Transitions,» 2022.
- [49] IEA, «Projected Costs of Generating Electricity 2020,» IEA, Dicembre 2020. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/projected-costs-of-generating-electricity-2020>. [Consultato il giorno 21 Novembre 2023].
- [50] Nucleare e ragione, «I costi legati alla produzione di energia,» [Online]. Available: <https://nucleareeragione.org/costi-legati-alla-produzione-di-energia/>. [Consultato il giorno 25 Novembre 2023].
- [51] M. V. S. A. B. y. L. S. M. M. P. C. H. J. .. & C. P. Berthelemy, «Unlocking Reductions in the Construction Costs of Nuclear: A Practical Guide for Stakeholders,» OECD_NEA, Parigi, 2020.
- [52] IEA, «LCOE range for selected dispatchable low emissions electricity sources in the Sustainable Development Scenario, 2030, 2040 and 2050,» IEA, 30 Giugno 2022. [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/lcoe-range-for-selected-dispatchable-low-emissions-electricity-sources-in-the-sustainable-development-scenario-2030-2040-and-2050>. [Consultato il giorno 23 Novembre 2023].

- [53] P. Risoluti, «ENERGIA NUCLEARE E ACCETTAZIONE SOCIALE,» Università Bocconi, 21 Giugno 2010. [Online]. Available: <https://www.unibocconi.eu/wps/wcm/connect/54d794804cadb91ea367ff0f7bdc7be0/Risoluti.pdf?MOD=AJPERES&useDefaultText=0&useDefaultDesc=0>. [Consultato il giorno 20 novembre 2023].
- [54] EnergoClub Onlus, «Uranio per energia nucleare,» Energoweb, [Online]. Available: <https://www.energoclub.org/page/uranio-per-energia-nucleare>. [Consultato il giorno 18 Novembre 2023].
- [55] D. P. L., in *L'energia nucleare*, Il Mulino, 2011, p. 124.
- [56] R. Piccolo, «Potenzialità, dubbi e rischi del nucleare di quarta generazione,» Linkiesta, 31 Gennaio 2023. [Online]. Available: <https://www.linkiesta.it/2023/01/potenzialita-dubbi-e-rischi-del-nucleare-di-quarta-generazione/>. [Consultato il giorno 12 Novembre 2023].
- [57] E. Buratin, «I reattori nucleari di quarta generazione e gli Small Modular Reactor,» Geopop, 21 Dicembre 2022. [Online]. Available: <https://www.geopop.it/i-reattori-nucleari-di-quarta-generazione-e-gli-small-modular-reactor/>. [Consultato il giorno 29 Novembre 2023].
- [58] E. Buratin, «Mini-reattori nucleari modulari SMR, cosa sono e perché sono il futuro dell'energia (per alcuni Paesi UE),» Geopop, 30 Marzo 2023. [Online]. Available: <https://www.geopop.it/mini-reattori-nucleari-modulari-smr-cosa-sono-e-perche-sono-il-futuro-dellenergia-per-alcuni-paesi-ue/>. [Consultato il giorno 30 Novembre 2023].
- [59] D. Moschella, «Nucleare, si riparte. Quali sono e come funzionano i nuovi reattori,» Policy Maker , 22 Settembre 2023. [Online]. Available: <https://www.policymakermag.it/fact-checking/nucleare-si-riparte-quali-sono-e-come-funzionano-i-nuovi-reattori/>. [Consultato il giorno 25 Novembre 2023].

- [60] A. Piemontese, «L'accordo di Cop28, la conferenza sul clima dell'Onu, spiegato per punti,» *Wired.it*, 13 dicembre 2023. [Online]. Available: <https://www.wired.it/article/cop28-dubai-conclusioni-accordo-transizione-fonti-fossili/>. [Consultato il giorno 16 Dicembre 2023].
- [61] V. Abbasova, «Czech Republic Excludes Rosatom from Nuclear Tender Amid Spat with Moscow,» 20 Aprile 2021. [Online]. Available: <https://caspiannews.com/news-detail/czech-republic-excludes-rosatom-from-nuclear-tender-amid-spat-with-moscow-2021-4-20-30/>. [Consultato il giorno 2023 11 20].
- [62] R. Millard, «UK Seeks to Block China from Nuclear Power Role,» *The Telegraph*, 26 Giugno 2021.
- [63] I. di Nicola Armaroli E Vincenzo Balzani 30 ottobre 2017, «La caccia all'uranio e i costi di una centrale,» 30 ottobre 2017. [Online]. Available: https://www.agi.it/blog-italia/energia-e-sostenibilita/la_caccia_all_uranio_e_i_costi_di_una_centrale-3285516/post/2017-10-01/#:~:text=La%20produzione%20del%20combustibile%20nucleare,rimpiazzate%20ogni%2018%20%E2%80%93%2024%20mesi.. [Consultato il giorno 17 Novembre 2023].
- [64] ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, «Costo livellato dell'elettricità (Levelized Cost of Electricity),» 15 Ottobre 2019. [Online]. Available: <https://www.efficienzaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-c/costo-livellato-dell-elettricit.html>. [Consultato il giorno 22 Novembre 2023].
- [65] AIN - Associazione Italiana Nucleare, «La Corea punta sulla propulsione nucleare nel trasporto marittimo,» AIN - Associazione Italiana Nucleare, 2021 Giugno 2021. [Online]. Available: <https://www.associazioneitaliananucleare.it/la-corea-punta-sulla-propulsione-nucleare-nel-trasporto-marittimo/>. [Consultato il giorno 30 Novembre 2023].

- [66] F. Valezano, «Idroelettrico, a ciascuno le sue emissioni di gas serra,» Qualenergia.it, 23 Novembre 2016. [Online]. Available: <https://www.qualenergia.it/articoli/20161123-idroelettrico-ciascuno-le-sue-emissioni-di-gas-serra/>. [Consultato il giorno 28 Ottobre 2023].
- [67] infoMercatiEsteri, «Disponibilità materie prime (UCRAINA),» Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale, [Online]. Available: https://www.infomercatiesteri.it/materie_prime.php?id_paesi=96#. [Consultato il giorno 12 Settembre 2023].
- [68] Wikipedia, «Accordo di Parigi (2015),» [Online]. Available: [https://it.wikipedia.org/wiki/Accordo_di_Parigi_\(2015\)](https://it.wikipedia.org/wiki/Accordo_di_Parigi_(2015)). [Consultato il giorno 24 Settembre 2023].
- [69] Alleanza Italiana per lo Sviluppo Sostenibile ASviS, «L'Agenda 2030 dell'Onu per lo sviluppo sostenibile,» ASviS, [Online]. Available: <https://asvis.it/l-agenda-2030-dell-onu-per-lo-sviluppo-sostenibile/#:~:text=Un%20piano%20d'azione%20per,alle%20persone%20che%20lo%20abitano..> [Consultato il giorno 14 Ottobre 2023].
- [70] Wikipedia, «Agenda 21,» [Online]. Available: https://it.wikipedia.org/wiki/Agenda_21. [Consultato il giorno 25 Settembre 2023].
- [71] BPER, «Stagflazione: cos'è e come funziona la combinazione di inflazione e stagnazione economica,» 17 Ottobre 2023. [Online]. Available: <https://www.bper.it/magazine/articoli-guide/stagflazione-cosa-e-come-funziona-la-combinazione-di-inflazione-e-stagnazione-economica#:~:text=Questo%20concetto%20dunque%20delinea%20uno,ultima%20C%20tasso%20di%20disoccupazione%20alto..> [Consultato il giorno 25 Novembre 2023].

- [72] Rinnovabili.it, «COP23: come aumentare i target rinnovabili degli NDC,» Rinnovabili.it, 17 Novembre 2023. [Online]. Available: <https://www.rinnovabili.it/energia/cop23-rinnovabili-ndc/>. [Consultato il giorno 17 Novembre 2023].
- [73] Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo - AICS, «Obiettivi di sviluppo sostenibile | SDGs,» Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo - AICS, [Online]. Available: <https://www.aics.gov.it/home-ita/settori/obiettivi-di-sviluppo-sostenibile-sdgs/>. [Consultato il giorno 25 Novembre 2023].
- [74] T. L. Matt Bright, «Cosa dice l'ultimo rapporto IPCC sulla cattura del carbonio?,» Clean Air Task Force -CATF, 20 Aprile 2022. [Online]. Available: [https://www.catf.us/it/2022/04/what-does-latest-ipcc-report-say-about-carbon-capture/#:~:text=Una%20delle%20tecnologie%20su%20cui,stoccaggio%20del%20carbonio%20\(BECCS\)..](https://www.catf.us/it/2022/04/what-does-latest-ipcc-report-say-about-carbon-capture/#:~:text=Una%20delle%20tecnologie%20su%20cui,stoccaggio%20del%20carbonio%20(BECCS)..) [Consultato il giorno 14 Settembre 2023].
- [75] WWF, «LA COP28 SIA LA COP DELLA CREDIBILITÀ CLIMATICA,» WWF, 23 Novembre 2023. [Online]. Available: <https://www.wwf.it/pandanews/clima/la-cop28-sia-la-cop-della-credibilita-climatica/>. [Consultato il giorno 24 Novembre 2023].
- [76] S. Lapini, «Metano gas serra: quanto è dannoso per il clima?,» Ollum.it, 26 Febbraio 2023. [Online]. Available: <https://ollum.it/metano-gas-serra-come-ridurre-emissione-ch4/#:~:text=Le%20principali%20fonti%20di%20emissione,combustibili%20fosfili%20e%20le%20discariche..> [Consultato il giorno 12 Ottobre 2023].

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare di cuore il Professore Piglione per il suo incredibile supporto e la costante disponibilità durante la realizzazione delle mie tesi di laurea. La sua esperienza, la sua disponibilità e il suo impegno nel mio percorso accademico sono stati essenziali per raggiungere questo importante traguardo.

Un ringraziamento speciale va ai miei genitori, soprattutto a mia mamma, per il loro amore incondizionato, la comprensione e il continuo sostegno. Chiedo scusa sinceramente per il ritardo nel conseguimento della laurea e per le preoccupazioni causate. Il vostro incoraggiamento è stato il motore che mi ha spinto ad affrontare ogni sfida, rendendo questo percorso ancora più significativo.

Un sentito ringraziamento alla mia compagna Resi, Alan e a tutta la mia famiglia per il costante sostegno offerto. La vostra presenza e l'affetto dimostrato hanno reso ogni passo di questo viaggio più leggero e gratificante.

Desidero esprimere la mia riconoscenza alla mia azienda per avermi concesso una pausa lavorativa significativa, consentendomi di dedicare il tempo necessario al conseguimento di questo tanto desiderato traguardo. Il vostro sostegno è stato fondamentale per la mia crescita personale e professionale.

Un ringraziamento particolare va all'Ing. Corbo, il "mio capo putativo", che non solo mi ha offerto preziosi consigli, ma ha dimostrato un interesse costante nel mio sviluppo, lavorativo e non. Nonostante i cambiamenti nei percorsi professionali, il suo sostegno e l'incoraggiamento sono stati una guida costante nel mio cammino, spingendomi a perseverare in ogni sfida con determinazione.

Grazie di cuore a tutte le persone straordinarie che hanno contribuito al mio percorso di laurea e che ho avuto il piacere di conoscere durante lo stesso, la mia "famiglia torinese" dalle quale non mi sono mai allontanato, nonostante la distanza, e a quella "modenese" che mi ha accolto come se ne facessi parte da sempre.

Sono profondamente grato per l'affetto, il supporto e la fiducia che mi avete donato.