



**UNIVERSITÀ
DI TRENTO**

**Dipartimento di
Economia e Management**

**Corso di Laurea Magistrale in
Management della Sostenibilità e del Turismo**

**FUSIONE NUCLEARE: L'ITALIA È PRONTA?
ANALISI DELL'ACCETTABILITÀ SOCIALE DI
UNA NUOVA TECNOLOGIA ENERGETICA
TRAMITE L'APPLICAZIONE DI UN DISCRETE
CHOICE EXPERIMENT**

**Relatrice
Prof.ssa Sandra Notaro**

**Laureando
Youssef Angiari**

Anno Accademico 2021/2022

Indice

Introduzione	9
1. L'energia: fonte di benessere tra sfide nazionali e globali	11
1.1. Il ruolo dell'energia nella società	11
1.1.1. Rilevanza economica dell'energia	12
1.1.2. La relazione tra consumo e benessere.....	13
1.1.3. L'intensità energetica.....	16
1.1.4. La produttività energetica	18
1.2. Il World Energy Trilemma	20
1.2.1. Il World Energy Trilemma Index	20
1.2.2. Analisi degli indicatori.....	23
1.3. Il cambiamento climatico	28
1.3.1. L'effetto serra e il riscaldamento globale	29
1.3.2. Effetti del cambiamento climatico	33
1.3.3. La responsabilità del settore energetico.....	34
1.3.4. Limiti dell'efficienza energetica	36
1.3.5. Accordi e obiettivi contro il cambiamento climatico.....	37
2. Fonti energetiche: un confronto	41
2.1. Non rinnovabili e rinnovabili: una macro distinzione	41
2.2. Il petrolio	42
2.2.1. Formazione, composizione e lavorazione.....	43
2.2.2. Risorsa conveniente e radicata.....	45
2.2.3. Una risorsa finita, inquinante e geopoliticamente rischiosa	47
2.3. Il gas naturale.....	54
2.3.1. Formazione, composizione e lavorazione.....	55
2.3.2. Versatilità a minori emissioni	56
2.3.3. I limiti del gas naturale	60
2.4. Il carbone	63
2.4.1. Formazione, composizione e lavorazione.....	64
2.4.2. Abbondanza e convenienza	66
2.4.3. Emissioni elevate e inquinanti tossici	68
2.5. Le fonti rinnovabili	72
2.5.1. Introduzione e analisi delle principali tecnologie	73
2.5.2. Energia abbondante a zero emissioni.....	78
2.5.3. Intermittenza e dipendenza da terre rare	82
2.6. La fissione nucleare	86
2.6.1. Il processo di fissione nucleare	87
2.6.2. Energia pulita, abbondante e costante.....	89
2.6.3. Costi di costruzione elevati e radioattività nociva	91
2.7. La fusione nucleare.....	96
2.7.1. L'energia del Sole sulla Terra.....	97
2.7.2. Energia inesauribile, pulita e sicura	100

2.7.3. Incertezze nello sviluppo ed elevati costi	104
2.8. Un passo in più	105
3. Esplorazione della letteratura scientifica esistente relativa a DCE in ambito energetico e sulla fusione nucleare	107
3.1. Risultati della literature review	107
3.2. Elementi di interesse dalla literature review	110
3.3. Spunti tratti dalla ricerca.....	119
4. Materiali e metodi.....	121
4.1. Il caso di studio.....	121
4.2. Il quadro concettuale alla base del DCE.....	122
4.3. Attributi e livelli selezionati	125
4.4. Disegno sperimentale	127
4.5. Campionamento e somministrazione del questionario	128
5. Analisi dei risultati	129
5.1. Analisi del campione di riferimento	129
5.1.1. Demografia e caratteristiche socio-economiche	129
5.1.2. Percezioni e opinioni del campione di riferimento	133
5.2. Analisi delle preferenze	138
5.2.1. Confronto tra Multinomial Logit e Random Parameter Logit.....	139
5.2.2. Analisi dei coefficienti.....	141
5.2.3. Eterogeneità delle preferenze e interazioni.....	144
5.2.4. Analisi ed interpretazione delle interazioni	144
5.2.5. Applicazione del Latent Class Model	148
5.3. Spunti per il decisore politico	151
Conclusioni.....	153
Bibliografia.....	157
Sitografia	183
Appendice	185

Introduzione

Ogni giorno, l'energia contribuisce al benessere delle società, rivestendo un ruolo fondamentale in molteplici settori chiave della vita quotidiana: dalla produzione alimentare al trasporto, dall'illuminazione al riscaldamento e raffrescamento delle nostre case. L'energia può dunque essere considerata la merce più importante a livello globale, capace di soddisfare i bisogni sociali di base, guidare la crescita economica e alimentare lo sviluppo umano. Tuttavia, la domanda energetica sta aumentando a livello mondiale, sia per lo sviluppo tecnologico da un lato, sia per il miglioramento delle condizioni di vita di una popolazione mondiale in continua crescita dall'altro. A ciò si aggiunge la sfida ambientale, che è sostanzialmente una sfida energetica. Con una produzione di CO₂ che arriva a quasi 40 Gt all'anno, il settore energetico contribuisce per il 75% delle emissioni mondiali totali. Il livello preoccupante di emissioni ha portato i Paesi e le organizzazioni partecipanti alla COP25 a stabilire una necessaria contrazione delle emissioni di CO₂, per contenere l'aumento medio delle temperature entro 1,5°C per il 2050.

Ogni Stato deve quindi adottare apposite politiche energetiche che riflettano sull'approvvigionamento di energia ad un costo ragionevole nel lungo periodo limitando, quanto più possibile, l'impatto ambientale che ne risulta; in altre parole, ogni Stato deve affrontare il *World Energy Trilemma*. Stabilire il mix energetico ideale al fine di soddisfare le tre sfere del trilemma energetico non rappresenta una sfida facile per i decisori politici, che devono valutare le fonti energetiche disponibili e soppesarne i vantaggi e le criticità connesse all'utilizzo. A tal fine, è utile che vi sia comprensione a livello socio-politico delle caratteristiche delle differenti fonti e tecnologie energetiche e sui *trade-off* che ciascuna presenta.

Ad oggi non esistono soluzioni energetiche prive di importanti limiti: le fossili, con risorse finite e un forte impatto clima-alterante; le rinnovabili, con una produzione intermittente, mancanza di tecnologie di stoccaggio su larga scala e dipendenza da terre rare; il nucleare tradizionale, con il problema delle scorie radioattive e una reputazione negativa, risultato dei disastri nucleari avvenuti negli ultimi 50 anni. In questo contesto, la promessa della fusione nucleare di fornire energia pulita, con rischi ridotti rispetto alla fissione e, per un tempo virtualmente infinito, sembra poter risolvere molti dei limiti appena esposti. Le difficoltà ingegneristiche relative allo sviluppo di questa promettente tecnologia energetica la renderanno auspicabilmente sfruttabile attorno al 2050.

Con il rischio che la fusione nucleare si trascini dietro la reputazione negativa della fissione nucleare, è importante per il decisore politico avere cognizione di quali siano le percezioni e l'accettabilità sociale verso questa nuova tecnologia. Con lo scopo di determinare gli elementi che incidono maggiormente sull'accettabilità sociale della fusione in Italia, è stato condotto un *Discrete Choice Experiment*. Nel primo capitolo verranno illustrati il ruolo dell'energia nella società, la sfida posta dal *World Energy Trilemma*, l'impatto del settore energetico sul cambiamento climatico e le iniziative pattuite internazionalmente per mitigare l'impatto sul riscaldamento globale. Il secondo capitolo porrà a confronto le principali fonti energetiche impiegate oggi, evidenziandone vantaggi e svantaggi, e presenterà le caratteristiche della promettente fusione nucleare. Il terzo capitolo analizzerà la letteratura scientifica presente, da cui si è attinto per la realizzazione del *Discrete Choice Experiment*. Il quarto capitolo presenterà i materiali e metodi per elicitare le preferenze degli individui. Infine, nel quinto capitolo, verranno esposti i risultati che evidenzieranno una sostanziale accettazione della tecnologia energetica, ma con precise preferenze rispetto agli attributi scelti. L'obiettivo finale è fornire al decisore politico informazioni che possano consentirgli di adattare, in maniera consapevole, gli sforzi di comunicazione pubblica e di *branding* della tecnologia, riconoscendone il grado di accettabilità nel contesto sociale in cui verrà introdotta.

Access to modern energy services is fundamental to fulfilling basic social needs, driving economic growth and fuelling human development.

- UNDP, 2008

All economic processes must require energy and there must be limits to the substitution of other factors of production for energy so that energy is always an essential factor of production.

- David I. Stern, 2010

Energy security is critical for social wellbeing, economic prosperity and successful clean energy transitions.

- IEA, 2020

Capitolo 1

1. L'energia: fonte di benessere tra sfide nazionali e globali

Per costruire una solida base per la prosperità e la competitività, i singoli Paesi devono bilanciare le tre dimensioni fondamentali che compongono il *World Energy Trilemma*: sicurezza energetica, equità energetica e sostenibilità ambientale (Austin, 2016). A complicare la questione vi è la crescita della popolazione mondiale e dei consumi energetici, che richiederà sempre di più un approvvigionamento costante e sostenibile di energia (Sloss e Loria, 2020), e la sfida climatica, che è essenzialmente una sfida energetica (IEA, 2021). La natura transnazionale dei mercati energetici e delle questioni ambientali richiede dunque un approccio che supera il livello nazionale (Austin, 2016). Le politiche energetiche attuate dai decisori politici, la scelta delle fonti energetiche impiegate e l'accettazione sociale saranno cruciali per garantire il benessere e invertire il cambiamento climatico (ONU, n.d) (WEC, 2015).

1.1. Il ruolo dell'energia nella società

È inequivocabile che l'energia sia alla base della nostra esistenza (EFDA¹, 2007). Ogni giorno, l'energia riveste un ruolo fondamentale in molteplici settori chiave della vita quotidiana; questi includono la produzione alimentare, il trasporto, la comunicazione, l'illuminazione, il riscaldamento e raffrescamento, ecc. I principali mezzi di trasporto impiegati quotidianamente, quali gli autoveicoli, i treni e gli aerei, si muovono perché

¹ European Fusion Development Agreement (in italiano Accordo Europeo per lo Sviluppo della Fusione), ora sostituito da EUROfusion: consorzio europeo per lo sviluppo della fusione nucleare.

alimentati con carburanti fossili o elettricità. La produzione di cibo consuma quantità significative di energia per il trasporto e la conservazione. Anche i moderni mezzi di comunicazione come telefoni e Internet non potrebbero funzionare ed esistere senza l'energia elettrica. Per concludere, anche riscaldare la propria casa nei mesi invernali e rinfrescarla nei mesi estivi non sarebbe possibile senza energia (Ibidem). Fatta questa premessa, emerge un'evidente dipendenza dalle fonti energetiche, le quali permettono di compiere attività fondamentali per l'esistenza e che hanno ripercussioni sulla qualità delle nostre vite. Pertanto, risulta altrettanto chiara la correlazione tra l'accesso a fonti energetiche abbondanti e di qualità e il benessere della società (ARPAV², 2009).

1.1.1. Rilevanza economica dell'energia

La fisica dimostra come l'energia sia indispensabile per la produzione economica, e, pertanto, anche per la crescita economica (Ashgar, 2008) (Stern, 2010). Tuttavia, i principali modelli delle attuali teorie economiche impiegate per spiegare la crescita economica non incorporano il concetto di energia quale fattore produttivo, elemento capace di influenzare ed alimentare o meno la crescita economica. Ciò collide con la grande attenzione che invece viene posta nei confronti delle variazioni di prezzo delle materie prime energetiche e delle possibili ricadute di carattere economico. Esempio è l'attenzione posta alle variazioni di prezzo del petrolio greggio. Quanto finora detto vale ad eccezione di due branche dell'economia: la *Resource economics* e la *Ecological economics*. Queste riflettono sul ruolo delle risorse naturali all'interno dell'economia e sull'influenza che possono esercitare su quest'ultima. I sostenitori della *Resource economics* hanno prodotto modelli che includono l'energia quale fattore produttivo necessario, mentre i sostenitori della *Ecological economics* attribuiscono spesso all'energia il ruolo cardine nel determinare la crescita economica (Stern, 2010).

Senza entrare nel merito delle dimostrazioni fisiche, il secondo principio della termodinamica³ descrive come sia richiesta una quantità minima di energia per poter portare a compimento una trasformazione, movimentare un corpo, o, più in generale, compiere un lavoro. Affinché la trasformazione avvenga in tempi ragionevoli, è richiesta una quantità maggiore di energia rispetto a quella necessaria perché la trasformazione stessa abbia luogo. Come appena citato, qualsiasi processo produttivo richiede lavoro; pertanto, qualsiasi

² Agenzia Regionale per la Prevenzione e Protezione Ambientale del Veneto.

³ Branca della fisica che studia l'equivalenza tra calore e lavoro (Treccani, n.d).

processo economico necessita di energia, rendendola di conseguenza un fattore essenziale della produzione (Ibidem).

A sostenere il ruolo cruciale dell'energia nella crescita economica e nel benessere della società non sono solo economisti ma anche alcuni geografi e storici. Tra questi ultimi, infatti, vi sono sostenitori del ruolo chiave giocato dal fattore energia nel determinare l'avvento e la collocazione geografica della Rivoluzione Industriale. Nel concreto, la relativa facilità di accesso alle riserve carbonifere in Gran Bretagna risulterebbe una delle condizioni che avrebbero alimentato il processo di industrializzazione inglese (Wrigley, 2013).

A questa visione che attribuisce all'energia il ruolo centrale nella crescita economica si contrappone una singola critica: la disponibilità sempre maggiore di energia, il progresso e l'avanzamento tecnologico e l'utilizzo di fonti energetiche di qualità sempre migliore hanno reso possibile un utilizzo di quantità inferiori di energia per unità di input e hanno ridotto i limiti imposti dalle risorse energetiche sull'output e sulla crescita economica. Questa critica tuttavia scalfisce solo lievemente l'assunto di partenza, rimanendo così l'energia un fattore importante (Stern, 2010).

1.1.2. La relazione tra consumo e benessere

A dare sostegno all'importanza rivestita dall'energia nei sistemi economici vi è la continua crescita nei consumi di energia primaria⁴ (Figura 1.1). Nel 2019⁵ il consumo di energia primaria ha registrato un incremento del 1,3% rispetto al 2018. Nel 2018 l'incremento era stato addirittura doppio, con un aumento pari al 2,9% rispetto al 2017. Nonostante l'aumento dei prezzi delle risorse energetiche fossili, quest'ultimo è stato l'incremento di consumi più significativo con un aumento di circa due volte la crescita media annua del decennio precedente (+1,5%). L'unico dato negativo si registra nel 2009 in conseguenza alla recessione. Complessivamente, dal 2009 al 2019, il consumo energetico è passato da 11.532 Mtep⁶ a 13.946 Mtep, un aumento globale del 20,9% (BP, 2019) (BP, 2020).

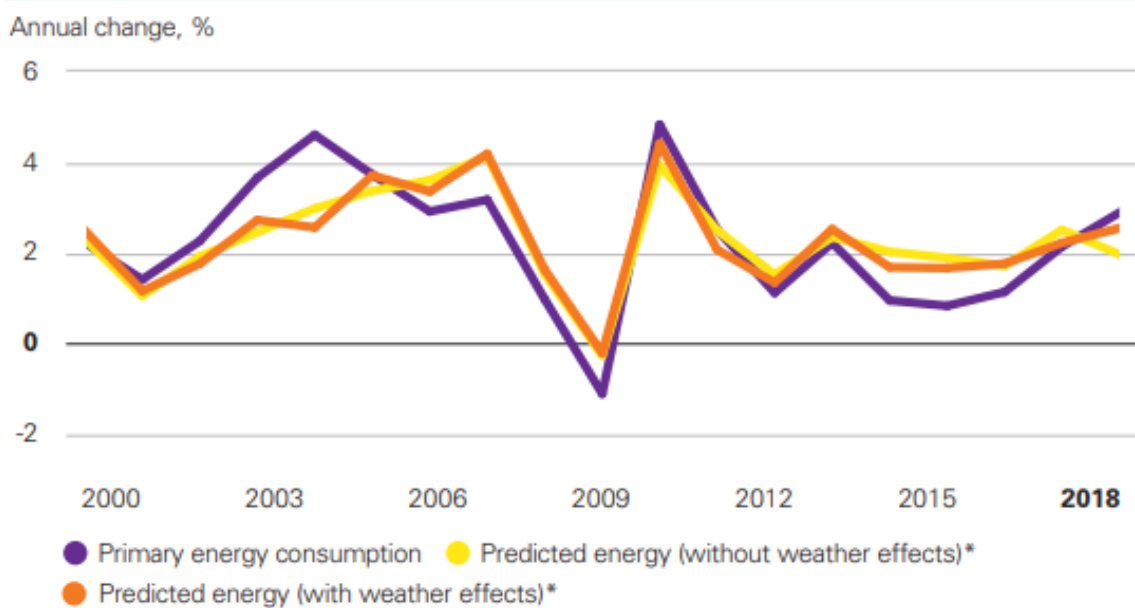
⁴ Si definiscono fonti di energia primaria i prodotti energetici estratti o ricavati da risorse naturali, dunque previa trasformazione delle stesse (Eurostat, n.d).

⁵ Nel corso della trattazione, il 2019 verrà preso come anno di riferimento in quanto i successivi accadimenti quali Pandemia da Covid-19 e Guerra Russo-Ucraina possono avere apportato distorsioni congiunturali notevoli.

⁶ Mega tonnellata equivalente di petrolio. Il tep è un'unità di misura dell'energia e indica la quantità di una qualsiasi fonte energetica in grado di sprigionare un'energia termica pari a quella fornita dalla combustione di una tonnellata di petrolio greggio (ENEA, n.d).

Figura 1.1 – Variazione percentuale annua dei consumi mondiali di energia primaria (2000-2018).

Global energy consumption growth



*These econometric models do not include Chinese energy intensive industries

Fonte: BP, 2019

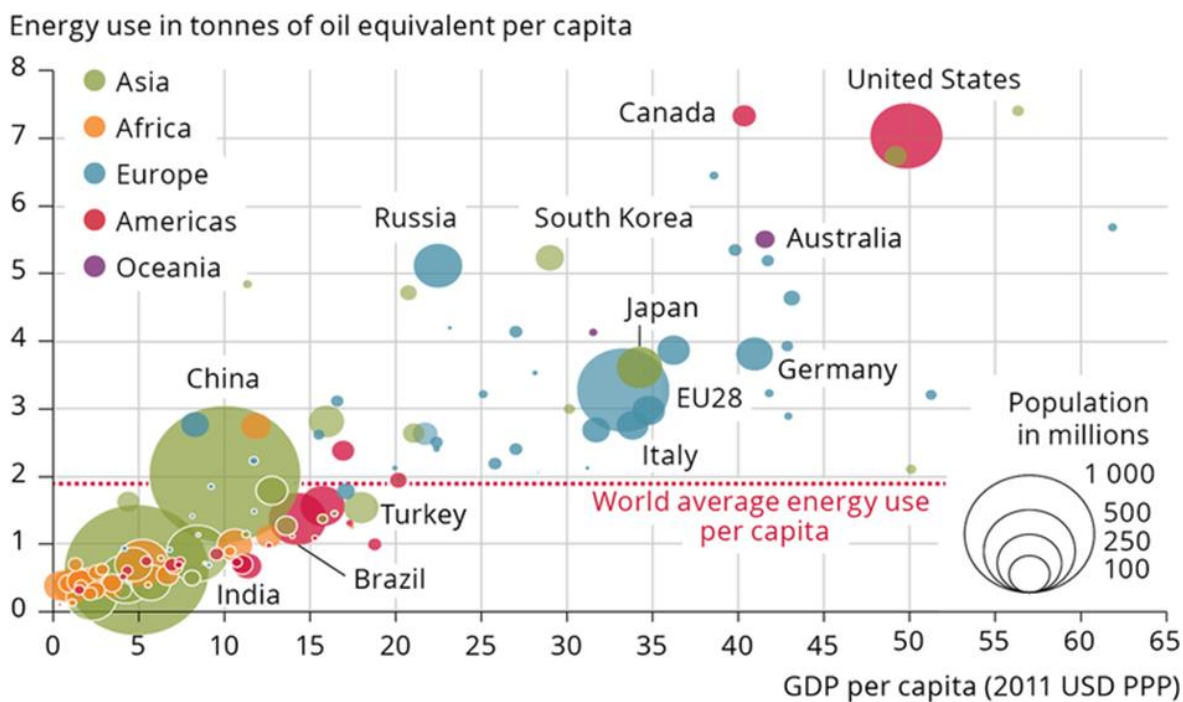
Secondo le previsioni dell'IEA (International Energy Agency), nel periodo 2017-2040 il consumo energetico subirà un incremento del 27%, pari a 3.743 Mtep⁷. Questa crescita sarà trainata dai Paesi in via di sviluppo.

Quanto finora esposto consente di cogliere l'importanza rivestita dall'energia per gli Stati e le loro economie; infatti, l'energia può essere considerata la merce più importante a livello globale. C'è una forte correlazione tra consumo di energia e benessere (EEA⁸, 2015). La relazione viene messa in evidenza dalla Figura 1.2. Quest'ultima mette a confronto i consumi pro capite di energia con il PIL pro capite dei diversi paesi. Si ricorre al PIL pro capite con lo scopo di eliminare le differenze tra i Paesi attribuibili principalmente al numero di abitanti differente.

⁷ Mega tonnellata equivalente di petrolio. Il tep è un'unità di misura dell'energia e indica la quantità di una qualsiasi fonte energetica in grado di sprigionare un'energia termica pari a quella fornita dalla combustione di una tonnellata di petrolio greggio (Treccani, n.d).

⁸ European Environment Agency.

Figura 1.2 – Relazione tra consumi energetici pro capite (espresso in Tep) e PIL pro capite (espresso in dollari a parità di potere di acquisto). Tutti i dati fanno riferimento al 2011.



Fonte: European Environment Agency, 2015

Generalmente, si osserva che a consumi energetici pro capite maggiori corrispondono valori più elevati del PIL pro capite, e dunque in maniera approssimativa, che il livello del benessere dipende dal quantitativo di energia consumato. Osservando la figura, si possono notare punti molto distanti dalla media mondiale dei consumi energetici: ad esempio, Canada e Stati Uniti sono da classificarsi tra i Paesi maggiormente “energivori”; al contrario, dalla parte opposta della figura, si trovano Paesi come la Cina che, nonostante sia responsabile di quasi un quarto dei consumi di energia primaria a livello mondiale (BP, 2020), si posiziona nei pressi della media. Analizzando ulteriormente la figura, è opportuno notare che vi sono anche diversi Paesi (es. Danimarca, Germania e Svizzera, ecc.), con valori del PIL pro capite simili (superiori ai 30.000\$), che registrano consumi energetici pro capite nettamente inferiori, quasi la metà dei Paesi più energivori citati precedentemente. Queste differenze si spiegano grazie ad un uso più razionale e misurato delle risorse energetiche da parte del secondo gruppo di Paesi preso in considerazione, frutto anche di tecnologie energeticamente più efficienti che vanno a mitigare la relazione tra PIL pro capite e consumi di energia primaria pro capite (Sharma et al., 2019).

Politiche di efficientamento energetico sono messe in pratica più frequentemente nei Paesi carenti di risorse energetiche proprie (Grimes et al., 2011). Infatti, i governi di questi Stati mettono in pratica differenti politiche per contrastare la *fuel poverty* (traducibile in “povertà

energetica”). Questi interventi possono prevedere sostegni al pagamento dei prezzi dei carburanti, tariffe sociali (sussidi) sui prezzi dell'energia, programmi di sovvenzioni per le spese associate ad interventi di efficientamento energetico e sostegni economici per ridurre i costi associati all'energia per individui e famiglie a basso reddito (Ibidem). Questi interventi statali sottolineano ulteriormente l'importanza dell'energia per il raggiungimento di livelli maggiori di benessere sociale.

La Figura 1.2 fa emergere un'ulteriore questione su cui è opportuno riflettere: la distribuzione disomogenea delle risorse energetiche mondiali. Infatti, basti pensare che, nel 2019, Cina, Stati Uniti ed Unione Europea, complessivamente rappresentanti circa un quarto della popolazione mondiale, hanno consumato il 52,3% dell'energia primaria mondiale (BP, 2020). Ciò implica necessariamente che i tre quarti restanti della popolazione mondiale possono disporre solo del 47,7% delle risorse energetiche disponibili. Una distribuzione così disomogenea non solo pone un problema etico che merita una riflessione, ma è anche opportuno domandarsi se l'attuale modello di sviluppo, basato sull'aumento continuo dei consumi energetici, sia sostenibile. Sarebbe auspicabile l'adozione di un approccio che prevedesse una riduzione nei consumi energetici abbinato a politiche di efficientamento nella produzione e consumo energetici per uno sviluppo più sostenibile.

1.1.3. *L'intensità energetica*

Fare un uso più appropriato dell'energia implica per gli Stati di doversi misurare con un indicatore specifico: l'intensità energetica. Tale indicatore riporta l'efficienza energetica di un'economia mettendo a rapporto il consumo interno lordo di energia (CIL) ed il PIL nazionale, ovvero offre una misura di quanta energia viene utilizzata da uno Stato per produrre un punto percentuale del proprio PIL (ENEA⁹, n.d):

$$I_e = \frac{CIL}{PIL}$$

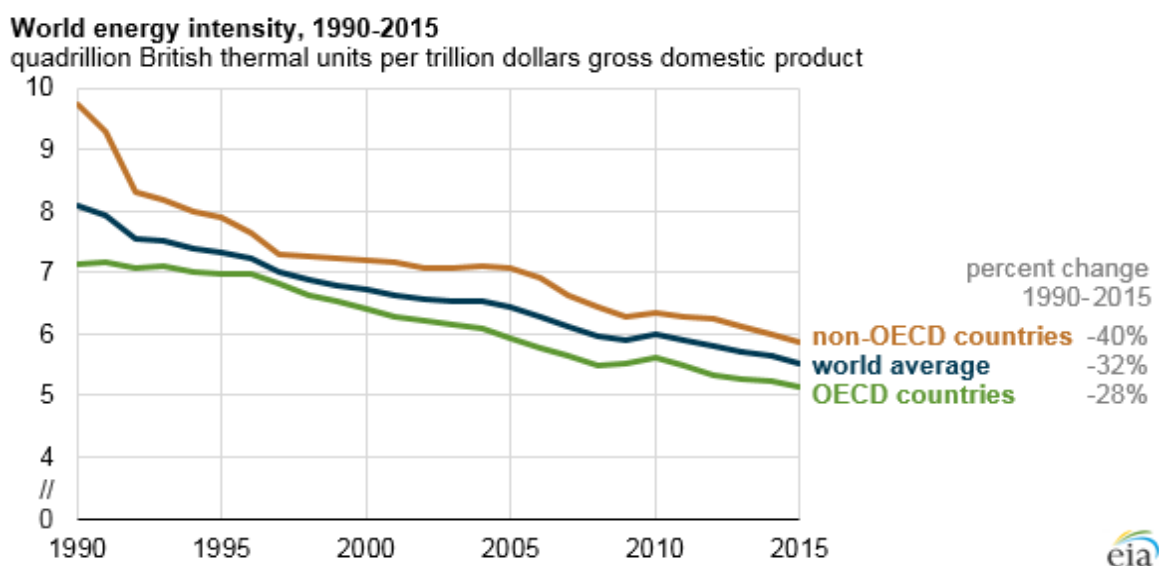
A livelli più elevati dell'intensità energetica corrisponderanno maggiori costi e consumi associati all'energia. Tuttavia, sono diversi i fattori che influiscono sull'intensità energetica di un Paese, quali cambiamenti nella struttura industriale ed economica e degli stili di vita, fattori climatici e geografici (Bernstein et al., 2003). Alla luce di ciò, una diminuzione dell'intensità energetica non sempre e non solo è spiegata da un miglioramento dell'efficienza energetica. Ad esempio, una transizione da una struttura produttiva ad elevato consumo di energia ad una a minore consumo, *ceteris paribus*, si traduce in una

⁹ Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.

riduzione dell'intensità energetica senza che questa sia accompagnata da un miglioramento in termini di efficienza energetica. Dunque, la struttura economica di un Paese influisce significativamente sulla propria intensità energetica (ENEA, n.d). Infatti, Paesi in cui il settore terziario incide maggiormente sul PIL avranno in linea di principio un'intensità energetica minore rispetto a Paesi con strutture economiche dipendenti da attività tradizionali quali l'industria pesante. A livello climatico, Paesi e aree geografiche con escursioni termiche più ampie tendono a consumare quantitativi maggiori di energia per il riscaldamento e /o raffrescamento. Infine, dal punto di vista geografico, le distanze tra le diverse aree urbane, e le infrastrutture a disposizione, influenzano notevolmente i consumi di energia richiesti per trasportare passeggeri e merci (Bernstein et al., 2003).

A livello globale, l'intensità energetica ha subito una riduzione di circa un terzo nel periodo 1990-2015, diminuendo tendenzialmente in tutte le regioni del mondo, con riduzioni verificatesi sia nelle economie più sviluppate dei Paesi OCSE¹⁰ sia nelle economie emergenti non OCSE (Figura 1.3) (EIA, 2016).

Figura 1.3 – Andamento dell'intensità energetica nel mondo nel periodo 1990-2015. Dati espressi in quadrilioni (10²⁴) di Btu¹¹ per mille miliardi di dollari di PIL.



Fonte: EIA e Oxford Economics, 2016

Storicamente, i livelli di intensità energetica dei Paesi non OCSE sono risultati essere più elevati di quelli rilevati nei Paesi OCSE. In molti paesi del primo gruppo, le economie si

¹⁰ Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (in inglese OECD: Organization for Economic Cooperation and Development).

¹¹ British thermal unit. Unità di misura dell'energia impiegata nel Regno Unito e negli Stati Uniti. 1 Btu = 2,519 * 10⁻⁸ Tep (ENEA, n.d)

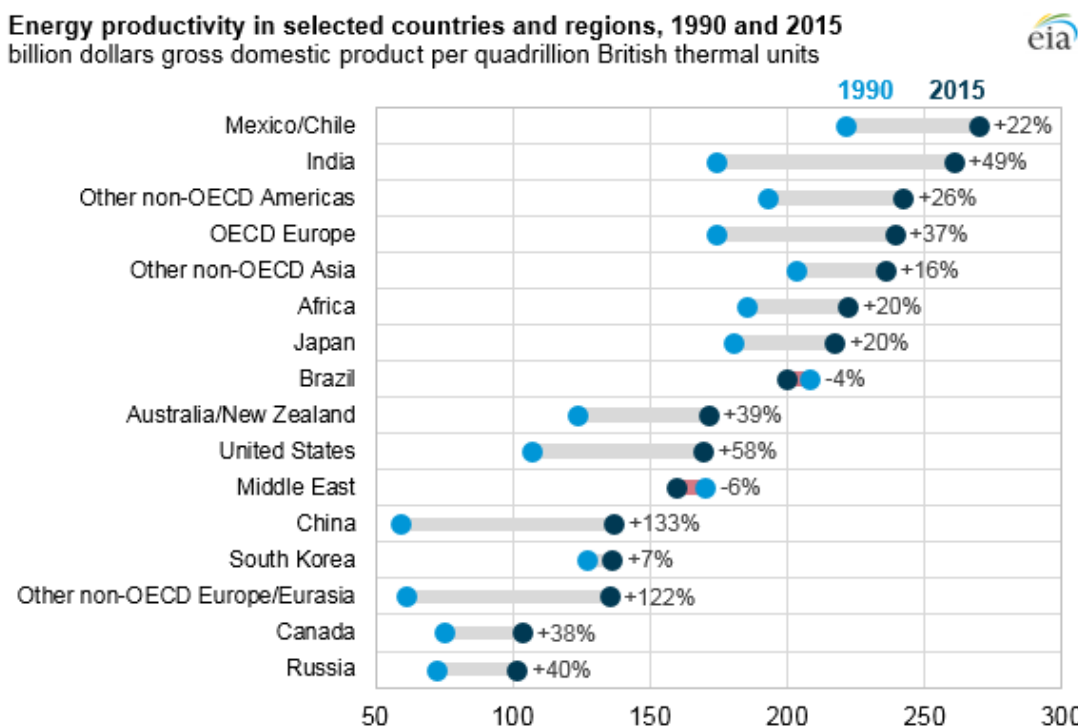
stanno industrializzando e dipendono su forme d'uso energetico più intensive. Dall'altra parte, le economie più avanzate sono passate da attività tradizionali più energivore ad un'economia basata principalmente sui servizi, traducendosi in un minor consumo energetico. Da quanto emerso da stime effettuate nel 2015, i Paesi OCSE hanno usato in media il 12% di energia in meno per ogni dollaro di PIL rispetto ai Paesi non OCSE (Ibidem).

1.1.4. La produttività energetica

Riflessioni sull'efficienza energetica non sono complete senza prendere in considerazione un altro indicatore, inversamente correlato con l'intensità energetica: l'indicatore della produttività energetica (EIA, 2016). Questo indicatore è il risultato del rapporto tra PIL e disponibilità energetica lorda calcolati in un dato anno e misura la produttività del consumo energetico, dunque misura l'output economico per ogni unità d'energia consumata (A2EP¹², n.d). Sono diversi i fattori che possono contribuire all'aumento della produttività energetica: cambiamenti strutturali nella produzione e consumo (da economie tradizionali a economie di servizi), uso più efficiente delle risorse e delocalizzazione delle attività a maggior consumo energetico.

¹² Australian Alliance for Energy Productivity.

Figura 1.4 – Produttività energetica in Paesi e regioni selezionati, 1990 e 2015. Dati espressi in miliardi di dollari di PIL per quadrilione di Btu.



Fonte: EIA e Oxford Economics, 2016

La Figura 1.4 offre una panoramica del miglioramento generale della produttività energetica nel mondo. Nel periodo di riferimento, la Cina è il Paese che ha mostrato l'incremento più consistente della produttività energetica, pari ad un aumento del 133%; questo risultato significa che l'output economico è aumentato più del doppio rispetto all'aumento dei consumi energetici (EIA, 2016).

In sintesi, l'accesso all'energia è fondamentale per soddisfare i bisogni primari, sostenere la crescita economica e per alimentare lo sviluppo umano. La domanda di energia è incrementata a livello globale, sia per lo sviluppo tecnologico da un lato, sia per il miglioramento delle condizioni di vita di una popolazione mondiale in continua crescita dall'altro. Risorse limitate, l'aumento dei prezzi delle fonti fossili e la necessità di limitare l'impatto ambientale hanno portato i Paesi e le loro economie a dover ripensare ai modelli di sviluppo e di crescita per renderli più sostenibili (Türkoğlu e Kardoğan, 2018). Ogni Stato deve dunque adottare apposite politiche energetiche che riflettano sull'approvvigionamento di energia ad un costo ragionevole nel lungo periodo limitando, quanto più possibile, l'impatto ambientale che ne risulta; in altre parole, ogni Stato deve affrontare il *World Energy Trilemma*.

1.2. *Il World Energy Trilemma*

In questa prima parte della trattazione si è arrivati alla conclusione che l'energia è la risorsa più importante per le economie moderne e per il raggiungimento di livelli apprezzabili di benessere. La sfida per i decisori politici si riassume nell'esigenza di creare un quadro strategico finalizzato al raggiungimento di tre obiettivi essenziali, riassumibili in: sicurezza energetica, equità energetica e sostenibilità ambientale (WEC, 2019). Mantenere queste tre dimensioni in equilibrio dà vita ad un "trilemma", che diventa sempre più complesso da gestire per i Paesi e per le compagnie energetiche, specialmente in un periodo storico dove è cruciale che si compia una transizione ad un sistema economico e produttivo a ridotte emissioni, dunque da un sistema energetico dipendente dalle fonti fossili¹³ ad un sistema basato su fonti rinnovabili e soluzioni verdi (Austin e Nottingham, 2018). La rapidità con cui avverrà la transizione e la capacità dei singoli Paesi di sviluppare e implementare politiche atte a distribuire energia in maniera sostenibile, differiscono tra i Paesi e le regioni del mondo. La transizione energetica è una sfida di politiche interdipendenti, il cui successo prevede il raggiungimento di determinate prestazioni attraverso le tre dimensioni del problema. Tali prestazioni prevedono complessi legami di coordinamento tra enti pubblici e privati, governi e autorità regolatrici, fattori economici e sociali, risorse nazionali, preoccupazione ambientale e comportamento individuale dei consumatori. Il World Energy Council riconosce l'importanza di adottare un approccio integrato ai sistemi energetici al fine di garantire i benefici di un'energia sostenibile per tutti (WEC, 2019).

1.2.1. *Il World Trilemma Energy Index*

Al fine di misurare le prestazioni dei Paesi nel soddisfacimento dei parametri nelle tre dimensioni del trilemma energetico, nel 2000, il World Energy Council¹⁴ ha elaborato e introdotto l'*Energy Trilemma Index*.

L'indice fornisce una valutazione obiettiva delle politiche energetiche nazionali e delle performance nelle dimensioni del trilemma energetico (WEC, 2019). L'analisi considera le politiche e misure messe in campo negli ultimi 20 anni dai Paesi membri, finalizzate al

¹³ Nel 2019, il consumo di energia primaria mondiale è dipeso dalle fonti fossili (carbone, petrolio e gas naturale) per un ammontare pari all'84,3% dei consumi circa. La restante percentuale è da suddividersi tra fonti rinnovabili ed energia nucleare (fissione), rispettivamente approssimativamente pari all'11,4% (di cui l'idroelettrico ammonta per il 6,4%) e 4,3% (BP, 2020).

¹⁴ Il World Energy Council è un'organizzazione nata nel 1923 che promuove modelli sostenibili di produzione e di uso dell'energia con il proposito di garantire il maggior beneficio sociale ed il minor impatto ambientale. L'organizzazione si compone di oltre 3000 membri provenienti da più di 90 Paesi, rappresentati da governi, società private e statali, mondo accademico, organizzazioni non governative e stakeholder del settore energetico (WEC, 2019).

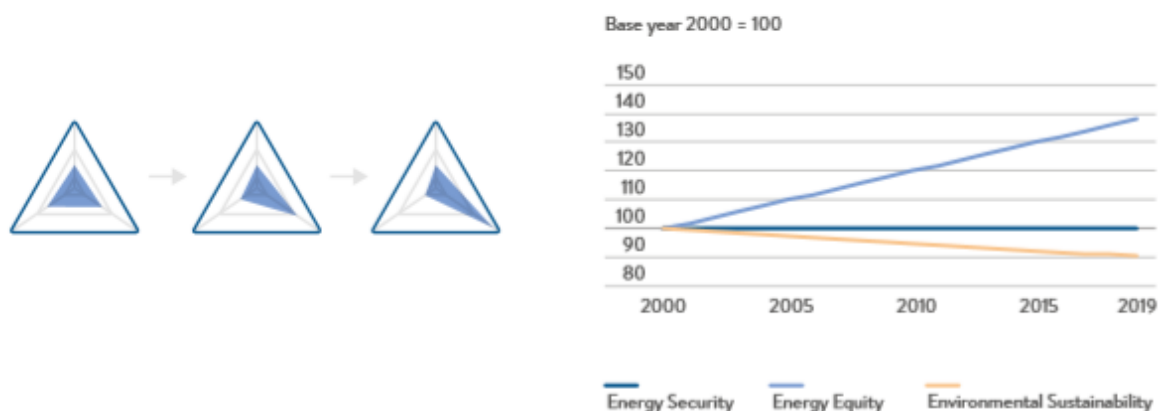
miglioramento delle proprie prestazioni in ciascuna sfera. Il risultato dell'analisi mostra l'evoluzione nel tempo delle posizioni dei singoli Paesi rispetto alle sfere del trilemma. Tali andamenti rappresentano un prezioso punto di partenza per instaurare un dialogo con i decisori politici, i quali hanno il delicato compito di guidare in maniera efficace la transizione energetica, assicurando prosperità e benessere ai propri cittadini. Adottare la struttura concettuale del trilemma per l'analisi delle tre dimensioni promuove coerenza e integrazione delle politiche, dimodoché i sistemi energetici siano bilanciati al meglio in un contesto che vede nella transizione energetica una sfida globale (Ibidem).

Il successo si osserva quando tutte e tre i pilastri del trilemma vengono soddisfatti contemporaneamente e in maniera continuativa, gestendo i possibili *trade-off* che possono crearsi (WEC, 2019) (Miyana, 2021). Ad esempio, la crescita economica può incrementare l'intensità energetica di un'economia, impedendo la sicurezza energetica attraverso una gestione inadeguata della domanda e con effetti sulla sostenibilità ambientale. Anche una transizione rapida verso fonti energetiche rinnovabili può mettere a rischio la robustezza dell'offerta, causando intermittenza della stessa. Ancora, una rapida elettrificazione che consenta di collegare comunità remote alla rete elettrica può migliorare l'equità, tuttavia, la stabilità di queste nascenti connessioni possono ostacolare la performance complessiva di un Paese riguardo la sicurezza energetica (WEC, 2019) (Figura 1.5a mostra un esempio).

Più precisamente, la Figura 1.5a mostra una situazione di squilibrio attribuibile ad un rapido miglioramento dell'equità energetica a danno della sostenibilità ambientale. Gli esempi sopraccitati vogliono evidenziare che le modalità con cui avviene la transizione sono fondamentali. Ogni Paese deve equilibrare i tre vertici del triangolo del trilemma energetico (Figura 1.5b) (Ibidem).

Figura 1.5a – Esempio di sistema energetico non sostenibile nel lungo termine che non vede soddisfatte le tre dimensioni del trilemma energetico.

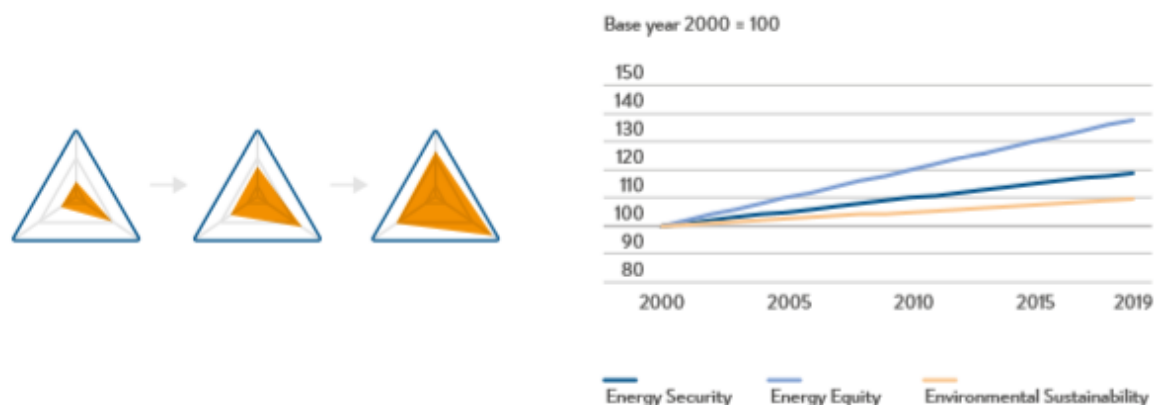
POOR PERFORMING SYSTEMS: IMBALANCED GROWTH ACROSS A FEW DIMENSIONS OF THE ENERGY TRILEMMA



Fonte: WEC, 2019

Figura 1.5b – Esempio di sistema energetico sostenibile nel lungo periodo.

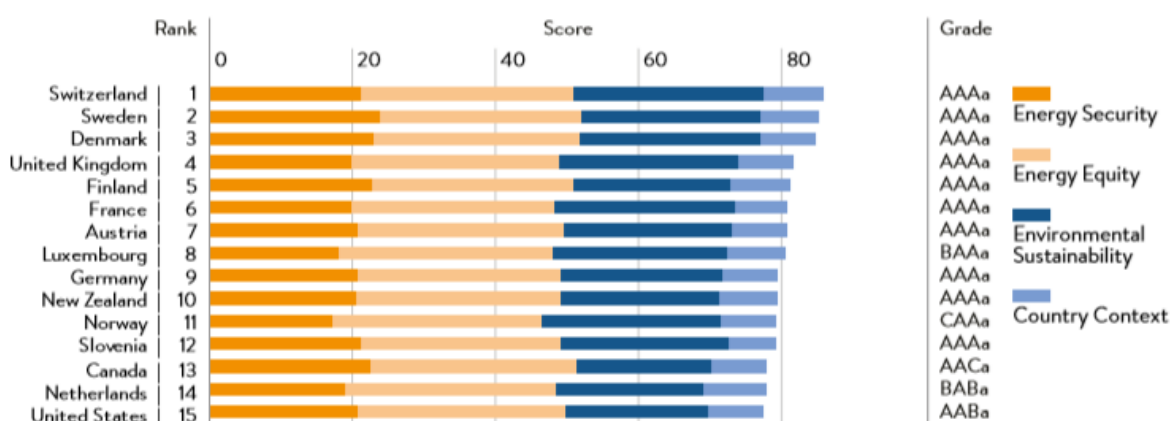
WELL PERFORMING SYSTEMS: SUSTAINABLE GROWTH ACROSS ALL DIMENSIONS OF THE ENERGY TRILEMMA



Fonte: WEC, 2019

Confrontare in maniera oggettiva il successo dei sistemi energetici dei diversi Paesi non è un processo agevole, tuttavia, l'utilizzo di una classifica che misuri le performance nazionali, tramite indicatori di riferimento, può facilitare il dialogo sulla coerenza delle politiche nazionali. Un'analisi più approfondita a livello regionale e nazionale può offrire ai decisori politici informazioni utili sulla traiettoria e sulle prospettive delle performance, sottolineando quali sono le priorità delle politiche future (Ibidem).

Figura 1.6 – Prime quindici posizioni dell’Energy Trilemma Index 2019.



Fonte: WEC, 2019

L’Energy Trilemma Index consente di stilare una classifica composta da 128¹⁵ Paesi. Questi vengono valutati in base alla capacità di sviluppare un sistema energetico sicuro, conveniente e ambientalmente sostenibile. A ciascun Paese è assegnato un punteggio di tre lettere (che possono assumere valore A, B, C e D) dove ognuna rappresenta le prestazioni nelle tre dimensioni del trilemma. Guardando la Figura 1.6, è possibile identificare i Paesi più virtuosi con punteggio pari a “AAA” (Marti e Puertas, 2022). L’indice rappresenta gli andamenti a livello nazionale rispetto ad alcuni indicatori di riferimento. Sebbene la classifica complessiva sia importante, gli andamenti e l’equilibrio nelle tre sfere forniscono le informazioni più preziose grazie alle quali affrontare, attraverso correzioni delle politiche energetiche, il trilemma energetico (WEC, 2019).

1.2.2. Analisi degli indicatori

I punteggi e le classifiche sono il risultato di un insieme di dati globali che rappresentano sia le prestazioni energetiche sia il contesto nazionale in cui viene gestito il sistema energetico (WEC, 2019). Gli indicatori di prestazione, rappresentati dalle tre dimensioni del trilemma e ognuno avente peso pari al 30% sulla performance finale, riguardano: l’offerta e la domanda di energia; l’equità in termini di accessibilità economica e accesso all’energia, l’intensità e l’efficienza nei consumi; l’impatto ambientale complessivo del sistema energetico. Infine, l’indicatore di contesto, con peso pari al 10%, fornisce una visione circostanziale più ampia delle prestazioni energetiche, considerando la capacità di un Paese di fornire quadri politici e regolativi prevedibili e coerenti, finanziare la ricerca e lo sviluppo, innovare e, infine, di attrarre investimenti (Marti e Puertas, 2022).

¹⁵ Il World Energy Trilemma Index include 133 Paesi, tuttavia, l’indice riporta i dati di 128 di questi a causa di dati insufficienti. I Paesi monitorati ma non classificati sono: Taiwan, Libya, Barbados, Siria e Yemen (WEC, 2019).

Nel dettaglio i tre indicatori di prestazione sono:

- **Sicurezza energetica:** Riflette la capacità di un Paese di soddisfare l'attuale e futura domanda di energia in maniera affidabile, resistere ed eventualmente riprendersi rapidamente da shock di sistema con un'interruzione minima dell'offerta (WEC, 2019). L'obiettivo essenziale di una politica energetica è la necessità di assicurare la continuità dell'offerta di energia; nel lungo periodo con un'offerta energetica solida, e similmente nel breve periodo con strumenti che consentano di rimediare a interruzioni dell'offerta (Owen, 2001). Ad esempio, nel periodo successivo alla crisi petrolifera degli anni '70, i paesi membri dell'International Energy Agency introdussero alcuni strumenti per limitare simili shock dell'offerta. Uno di questi è il meccanismo delle scorte strategiche: i Paesi membri devono impegnarsi a mantenere un livello minimo di scorte petrolifere (petrolio e prodotti petroliferi) equivalenti ad almeno 90 giorni di importazioni nette, calcolati sulla media giornaliera interna nell'anno precedente (Ibidem). Queste scorte mitigano gli effetti di un eventuale interruzione della fornitura. Tuttavia questo approccio prudenziale, basato sulle scorte, rappresenta un costo elevato di accumulazione della riserva (in particolare costo infrastrutturale). Tale costo, combinato con l'importanza declinante del petrolio in una prospettiva di decarbonizzazione delle fonti energetiche, suggerisce che pochi Paesi seguiranno in futuro questa soluzione (WEC, 2019). Molti Paesi hanno diversificato il proprio portafoglio energetico includendo varie fonti rinnovabili. Questo ha ridotto la dipendenza dalle importazioni di prodotti energetici, tuttavia ha creato una maggiore dipendenza da fattori meteorologici, la cui variabilità va gestita, possibilmente attraverso una maggior interconnessione con le reti attigue o nuove tecnologie di stoccaggio dell'energia (Ibidem).
- **Equità energetica:** Valuta la capacità di un Paese di fornire un accesso universale all'energia per uso domestico e commerciale che sia abbondante, conveniente e a prezzi ragionevoli (Ibidem). Abbracciando il principio dell'energia come motore della prosperità, solo una solida disponibilità energetica universale può consentire benessere sociale e stili di vita moderni (MAECI¹⁶, 2018) (WEC, 2019). Questo implica valutare innanzitutto l'accessibilità all'energia, ma anche considerare l'abbondanza di energia accessibile pro capite e i costi associati. Contrariamente alle

¹⁶ Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale.

altre dimensioni del trilemma, dove più indicatori possono mostrare un miglioramento sincrono, la dimensione dell'equità è sequenziale: accessibilità ed elettrificazione sono prerequisiti dell'abbondanza e della qualità dell'offerta, che, a propria volta, costituiscono una sfida di equa convenienza per i consumatori sul lungo periodo (WEC, 2019).

Molto del successo dell'equità può essere spiegato da fattori geografici e dalla distribuzione e densità degli abitanti (Ibidem) Ad esempio, il Lussemburgo da anni detiene la medaglia d'oro sul podio dell'equità energetica grazie al fatto di essere uno Stato ricco con forti interconnessioni che rendono possibile un mercato energetico vivace con prezzi altamente competitivi. Singapore e Olanda sono Paesi con popolazioni ricche concentrate in aree ristrette, rendendo l'energia conveniente e facilmente accessibile. L'Islanda è un altro Paese che da anni riceve un punteggio elevato nella sfera dell'equità, grazie a prezzi convenienti dell'elettricità derivante dall'abbondante generazione di energia rinnovabile (in particolare idroelettrica e geotermica). Infine, i Paesi detentori di grandi riserve di idrocarburi, quali i Paesi del Golfo, possono produrre grandi quantità di energia elettrica a basso costo rendendola accessibile alla popolazione. Il lato negativo di questa abbondanza energetica è che non incoraggia l'efficienza, e spesso, ciò si traduce in prestazioni deludenti dal lato della sostenibilità ambientale (Ibidem).

Dunque riassumendo, gli elementi trainanti del successo in questa sfera includono investimenti relativi all'accessibilità e alle infrastrutture necessarie per estendere la rete elettrica, e perciò dipendenti dalla crescita economica. Aspetti geografici giocano un ruolo fondamentale, assieme alla distribuzione della popolazione, dove una maggior densità abitativa si traduce in connessioni alla rete energetica più facili. Infine, Paesi grandi produttori di energia possono fornire ai propri cittadini energia a prezzi che si avvicinano ai costi di produzione, ma vanno presi in considerazioni potenziali *trade-off* con la sfera della sostenibilità ambientale (Ibidem).

- **Sostenibilità ambientale:** Rappresenta i progressi del sistema energetico di un Paese rispetto all'attenuazione e alla riduzione di potenziali impatti clima-alteranti e la capacità di evitare danni ambientali (Ibidem). Le ottime prestazioni di certi Paesi in questa dimensione sono il risultato di obiettivi ambiziosi: di miglioramento della produttività e dell'efficienza nella produzione, trasmissione e distribuzione energetica; di passaggio ad un'economia a ridotte emissioni attraverso l'aumento

nell'uso di energia derivante da fonti rinnovabili; di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra e miglioramento della qualità dell'aria (Marti e Puertas, 2022).

In questa dimensione, l'Europa svetta sugli altri continenti, con molti paesi membri dell'Unione Europea presenti in testa alla classifica (cfr. Figura 1.6) (WEC, 2019). Questo risultato è in linea con le importanti politiche a favore della sostenibilità ambientale messe in atto in quella specifica area geografica, e che rispondono agli impegni presi con il Protocollo di Kyoto (1997) e l'Accordo di Parigi (2015). Infatti, l'UE vede nella lotta al cambiamento climatico una delle sfide più importanti verso cui dirigere il proprio impegno e risorse. Gli obiettivi di riduzione delle proprie emissioni di gas clima-alteranti hanno come termine ultimo il 2050, con tappe intermedie. Queste sono il “2020 climate and energy package¹⁷” e il “2030 climate and energy framework¹⁸”. Questo insieme di misure e obiettivi pone l'UE sulla strada di una transizione verso un'economia a ridotte emissioni di gas serra, come esplicitato nella “2050 low-carbon roadmap¹⁹” (MAECI, 2018).

Tali sforzi sono rafforzati dall'entrata dell'energia da rinnovabili in un circolo virtuoso che vede una diminuzione dei costi, un aumento del dislocamento delle tecnologie necessarie alla produzione di energia (pannelli fotovoltaici, pale eoliche ecc.) e un'accelerazione nel progresso tecnologico, specialmente nel campo dell'energia solare ed eolica. Le future prospettive di sviluppo delle tecnologie di stoccaggio dell'energia renderanno questi progressi ancora più efficaci nel raggiungimento di obiettivi di sostenibilità e di prestazione (IRENA²⁰, 2017).

Dall'altra parte, Paesi ricchi di giacimenti di idrocarburi tendono ad avere punteggi

¹⁷ Pacchetto di leggi proposto dalla Commissione UE nel 2007 ed entrato in vigore nel 2009 con la Direttiva 2009/28/CE. Pose tre obiettivi che gli Stati membri dovevano raggiungere entro il 2020: a) riduzione delle emissioni di CO₂ del 20% rispetto ai livelli del 1990; b) aumento dell'efficienza energetica pari al 20% del consumo totale di energia primaria; c) incremento della percentuale complessiva delle energie rinnovabili, portandola fino al 20% del consumo totale UE (Boschetti, 2009) (Commissione europea, n.d).

¹⁸ L'Unione Europea, tra fine 2018 e inizio 2019, ha definito i propri obiettivi in materia di energia e clima nel periodo 2021-2030, adottando il pacchetto legislativo *Clean Energy Package*. Gli obiettivi principali sono: a) riduzione delle emissioni di CO₂ di almeno il 40% rispetto ai livelli del 1990; b) aumento dell'efficienza energetica pari ad almeno il 32.5% del consumo totale di energia primaria; c) incremento della percentuale complessiva delle energie rinnovabili, portandola fino al 32% del consumo totale UE. Tuttavia, il quadro regolatorio è in evoluzione. La Commissione europea infatti ha adottato, con Regolamento 2021/1119/UE, un pacchetto di proposte ancora più ambiziose. Infatti, l'obiettivo per il 2030 è la riduzione delle emissioni di carbonio fino al 55% rispetto ai livelli del 1990 (Camera dei Deputati, 2021) (Commissione europea, n.d).

¹⁹ È Una strategia di lungo termine, proposta a fine 2018 e racchiusa nella *Europe Climate Law* nel 2020, che mira a rendere l'UE climaticamente neutrale entro il 2050. L'obiettivo principale consiste nel ridurre le emissioni di gas ad effetto serra del 80-95%, diventando così una low-carbon economy entro tale scadenza. Tale obiettivo trova le sue radici nel Green Deal europeo ed è in linea con gli impegni presi con la sottoscrizione dell'Accordo di Parigi (COP21), il cui obiettivo è mantenere l'aumento delle temperature entro 1,5°C (Commissione europea, n.d) (European Climate Foundation, n.d).

²⁰ International Renewable Energy Agency.

più bassi in questa sfera, e le loro prestazioni nel tempo mostrano lievi miglioramenti se non addirittura nulli. Alcuni di questi mostrano andamenti di lungo periodo decrescenti che vanno addirittura al di sotto dello standard di riferimento del 2019. Infatti, una crescita economica alimentata da fonti energetiche inquinanti riduce i punteggi dell'intensità energetica e dell'intensità di CO₂, i quali sono indicatori chiave di questa dimensione del trilemma (WEC, 2019).

In questa sfera, gli sforzi per la decarbonizzazione e il controllo dell'inquinamento stanno diventando i più importanti motori della prestazione complessiva all'interno del trilemma. Per sistemi energetici avanzati, la sicurezza energetica è ormai stabile. Una volta raggiunto l'obiettivo di accessibilità, la dimensione dell'equità energetica diventa un elemento di importanza minore nelle prestazioni complessive di un Paese. Perciò, cambiamenti nella sfera della sostenibilità diventano di grande importanza per migliorare la propria posizione rispetto al trilemma (Ibidem).

Prestazioni in miglioramento nella dimensione della sostenibilità tendono ad essere favorite da aspirazioni locali nei Paesi con economie in via di sviluppo, in contrasto con le modalità programmatiche ambientali più ampie dei Paesi OCSE e dei Paesi membri dell'UE. Sia per Paesi sviluppati e in via di sviluppo, la transizione energetica è incoraggiante e stimola a ricercare nuove vie per abbassare le emissioni per un futuro più sostenibile. Tuttavia, sono in molti ad auspicare che questa transizione sia più rapida per evitare un aggravio eccessivo del cambiamento climatico (Ibidem).

Agli indicatori di prestazione va affiancato l'indicatore di contesto. Il punteggio relativo a questo indicatore è rappresentato dalla quarta lettera in minuscolo (cfr. Figura 1.6). L'indicatore di contesto si concentra su quegli elementi che permettono ai Paesi sotto analisi di sviluppare ed implementare in maniera efficace le opportune politiche energetiche e di raggiungere con successo gli obiettivi in materia energetica. Alcuni elementi su cui si focalizza l'indicatore sono: la stabilità macroeconomica, la stabilità politica, lo stato di diritto e la qualità della regolamentazione (WEC, 2019) (Marti e Puertas, 2022).

È interessante notare che dal 2000 non vi sono Paesi a miglioramento continuo. Questo è un dato utile, poiché implica che la transizione energetica globale ha storicamente dovuto far fronte a vari *trade-off*, con paesi che riuscivano a gestire una o due dimensioni del trilemma, a spese della terza. Ciò indica che la sfida posta dal trilemma energetico rimane a tutt'oggi di grande rilevanza (WEC, 2019). A maggior ragione è rilevante poiché

costituisce un problema di taglio globale: sempre più le politiche energetiche dei governi nazionali vanno calate e coordinate in un contesto internazionale. La prospettiva più probabile è di una “unità globale”, in cui le misure di una politica energetica di un Paese possono costituire un’esternalità, sia positiva che negativa, per gli altri Paesi. Pertanto, i governi nazionali non sono liberi di gestire la propria politica energetica senza tener conto degli altri. In particolare, la questione dell’effetto serra ha reso necessario coordinare le politiche energetiche, al fine di raggiungere non solo gli obiettivi nazionali, ma anche gli obiettivi internazionali (Owen, 2001).

Per concludere, la politica energetica deve guardare non solo all’efficienza, ma deve interessarsi anche all’equità sociale, alle problematiche associate all’impatto ambientale causato dall’uso dell’energia e alla sostenibilità di lungo periodo delle risorse energetiche disponibili per la società. In questo contesto, che vede la transizione dalle fonti fossili a fonti energetiche a basse emissioni quanto mai necessaria per contenere l’aumento delle temperature entro 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali (IPCC²¹, 2018), l’emergenza climatica rappresenta la priorità per i governi di tutto il mondo (SDG 13²², ONU). Questo si traduce in un necessario ripensamento del settore energetico al fine di mitigare, fino ad auspicabilmente azzerare, l’effetto di questo settore sulle emissioni di gas serra e, in ultima analisi, sul riscaldamento globale (MAECI, 2018).

1.3. Il cambiamento climatico

Il decennio 2010-2019 è risultato il più caldo da quando esistono registrazioni attendibili delle temperature terrestri. Dagli anni '80, ogni decennio successivo è stato più caldo di tutti i precedenti, tornando indietro fino al 1850 (WWF). Il 2019 è stato il secondo anno più caldo mai registrato, con un incremento medio della temperatura globale di 1,1°C circa rispetto al periodo preindustriale. Questo aumento avviene attualmente ad un ritmo di circa 0,2°C per decennio (Commissione europea). Gli effetti del cambiamento climatico sono visibili in tutte le regioni del mondo. Le calotte polari e i ghiacciai si sciolgono e cresce il livello dei mari. In alcune regioni, i fenomeni meteorologici estremi e i nubifragi sono sempre più diffusi, mentre altre sono colpite da siccità e ondate di calore mai registrate prima (Ibidem). I cambiamenti climatici sono dovuti sia a variabilità intrinseche del sistema climatico, che a fattori esterni, sia naturali che antropici (Zucchetti, 2005). Tuttavia, gli effetti anomali sul clima a cui assistiamo da 150 anni sono da attribuirsi quasi esclusivamente all’uomo e alle

²¹ Intergovernmental panel on climate change.

²² Obiettivo di sviluppo sostenibile 13 inserito nell’Agenda 2030 dell’Organizzazione delle Nazioni Unite che si focalizza sulla lotta al cambiamento climatico (ONU, n.d).

sue attività. A partire dalla rivoluzione industriale, l'uomo ha repentinamente cominciato a rovesciare nell'atmosfera milioni di tonnellate di CO₂ e altri gas ad effetto serra (ENEL, n.d) a causa soprattutto dell'utilizzo di fonti energetiche fossili (Zucchetti, 2005).

1.3.1. L'effetto serra e il riscaldamento globale

La causa principale del cambiamento climatico è l'effetto serra (Commissione Europea, n.d). L'effetto serra è un fenomeno “naturale”, che esiste sin da quando la Terra è dotata di atmosfera, e grazie al quale la temperatura sul pianeta si inserisce in un intervallo che consente lo sviluppo della vita (Zucchetti, 2005). Il fenomeno è reso possibile dalla presenza di alcuni gas nell'atmosfera che formano un mantello isolante attorno alla Terra. Le radiazioni solari che giungono sul nostro pianeta vengono in parte riflesse dalla superficie terrestre, ma i gas che compongono l'atmosfera, che hanno lasciato entrare tali radiazioni, riescono a trattenerne una parte che viene rimandata verso il suolo. Il meccanismo è il medesimo delle serre di vetro (EFDA, 2007). L'utile e benefico effetto serra “naturale” che l'atmosfera mette a disposizione può diventare più o meno grande a seconda della composizione dei gas che la costituiscono. Il delicato bilancio di radiazioni solari in entrata e uscita può venire alterato dal suo valore di equilibrio naturale se la composizione dei gas atmosferici muta per qualche ragione (Zucchetti, 2005).

L'atmosfera è composta da diversi gas. Le attività antropiche emettono nell'atmosfera principalmente 4 tipologie di gas che vanno ad influenzarne i relativi valori di equilibrio (EPA²³, n.d). Questi sono:

Biossido di carbonio (CO₂): la principale emissione derivante dalla attività antropiche (Figura 1.7). La fonte primaria di emissioni di CO₂ è l'utilizzo di fonti energetiche fossili. La restante parte di emissioni di CO₂ con cause antropiche (pari a circa il 10% delle emissioni) è da attribuire alla deforestazione e al cambio d'uso del suolo²⁴.

Metano (CH₄): il secondo gas per percentuale di emissioni. Il metano si libera nell'atmosfera in particolare a causa delle attività agricole, gestione dei rifiuti, fughe di metano e combustione di biomassa.

²³ United States Environmental Protection Agency.

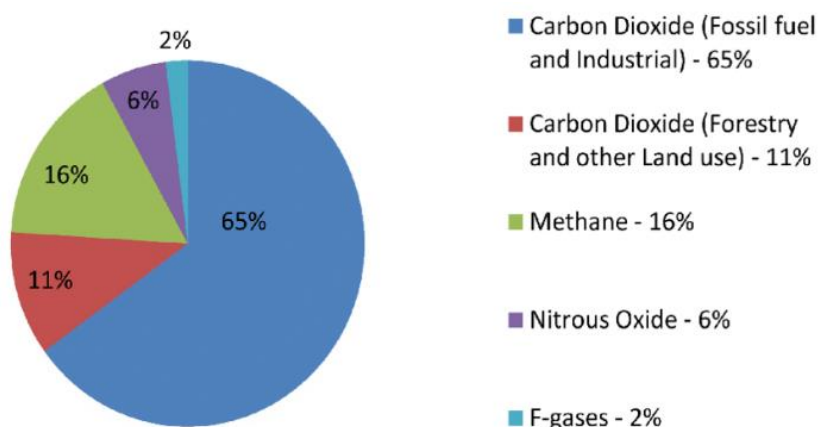
²⁴ Nel 2019, le emissioni di CO₂ causate da cambi d'uso del suolo sono ammontate a 3,8 Gt. Tre quarti di tali emissioni sono state causate dalla deforestazione per scopi agricoli. Gli alberi assorbono CO₂. Se vengono abbattuti, il carbonio immagazzinato negli alberi viene rilasciato nell'atmosfera e minore è la capacità di assorbimento e cattura (FAO, 2020).

Ossido di diazoto (N₂O): gas emesso principalmente a causa delle attività agricole, in particolare l'uso di fertilizzanti. Anche la combustione di fonti fossili genera emissioni di N₂O.

Gas fluorurati (F-gases): famiglia di gas artificiali emessi da processi industriali, refrigerazione (HFC: idrofluorocarburi), isolamento nelle connessioni alla rete elettrica (SF₆: esafluoruro di zolfo) e dal settore elettronico e farmaceutico (PFC: perfluorocarburi).

Sebbene non un gas, anche il nero di carbonio (particolato carbonioso) disperso nell'atmosfera contribuisce in maniera significativa all'effetto serra, assorbendo radiazioni solari e infrarosse (Ibidem).

Figura 1.7 – Emissioni globali di gas ad effetto serra per tipologia di gas (emissioni globali registrate nel 2010).



Fonte: IPCC, 2014

Le emissioni globali di CO₂ continuano ad aumentare in maniera sostenuta, anziché diminuire (Figura 1.8). Dal 1990 al 2019, le emissioni globali annue di CO₂ sono aumentate del 62% circa, raggiungendo quota 36,7 Gt²⁵ nel 2019 (Friedlingstein et al., 2019). Questo dato ha portato i Paesi e le organizzazioni partecipanti alla COP25²⁶ a stabilire una necessaria contrazione delle emissioni di CO₂, pari ad una riduzione annua del 7,6% fino al 2030 per contenere l'aumento delle temperature entro 1,5°C (Barolini, 2019). Tuttavia, non sembrano esserci riduzioni, ad eccezione di quella avvenuta nel 2020, causata dalla Pandemia di Covid-19 (-5,2%) (IEA, 2022). Infatti, a maggio 2022, il NOAA²⁷ ha registrato

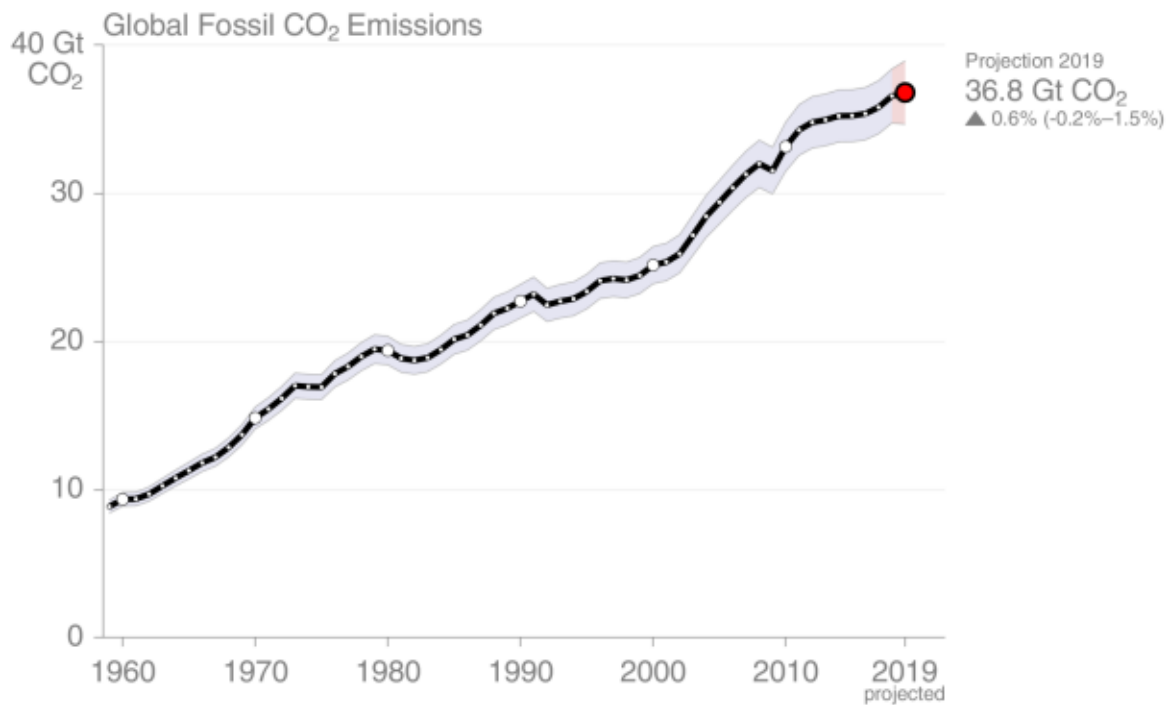
²⁵ Gigatonnes: miliardi di tonnellate.

²⁶ Conferenza delle Parti aderenti alla convenzione quadro delle Nazioni Unite sul cambiamento climatico tenutasi a Madrid nel 2019 (ONU, n.d).

²⁷ National Oceanic and Atmospheric Administration.

la concentrazione di CO₂ nell'atmosfera più alta mai registrata, pari a 421 ppm²⁸. Questa concentrazione di CO₂ è il 50% più elevata rispetto ai livelli preindustriali (NOAA, 2022). Ciò è in linea con le emissioni annue di CO₂ sempre crescenti (Figura 1.9).

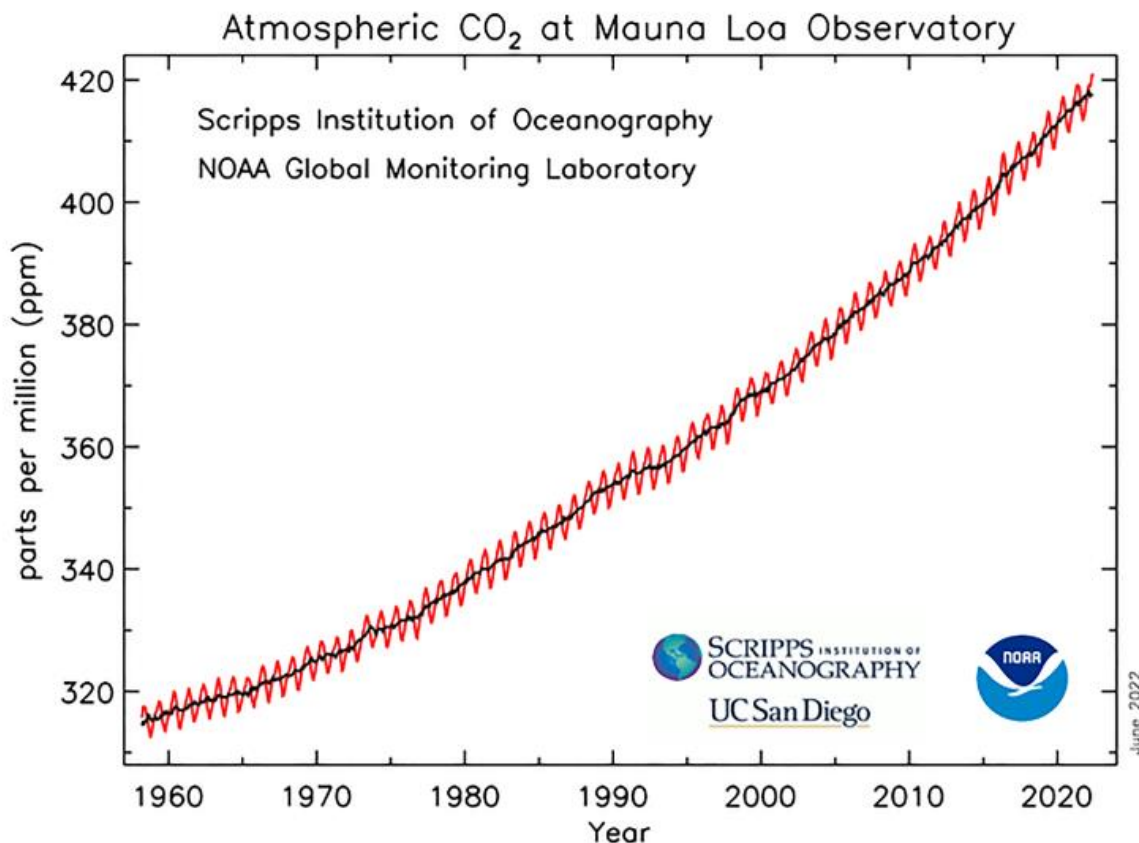
Figura 1.8 – Andamento delle emissioni globali annue di CO₂ associate all'utilizzo di fonti fossili. Periodo 1960-2019.



Fonte: *Global Carbon Project, 2019*

²⁸ Parti Per Milione. Espressione usata per esprimere la concentrazione di una sostanza presente in una miscela (Treccani, n.d)

Figura 1.9 – Andamento globale medio annuo della concentrazione di CO₂ nell’atmosfera registrata dall’osservatorio di Mauna Loa, Hawaii. Periodo 1958-2022.



Fonte: NOAA, 2022

Sebbene le emissioni di CO₂ rappresentino circa tre quarti del totale delle emissioni derivanti dalle attività antropiche (Figura 1.7), è opportuno tenere in considerazione le differenze tra questi gas. Infatti, i gas ad effetto serra possono differire per la capacità di assorbire energia, avendo differente efficienza radiativa, e per il tempo di permanenza nell’atmosfera²⁹ (Vallero, 2019). Il *Global Warming Potential* (GWP) è stato sviluppato per permettere il confronto tra le differenti capacità di riscaldamento globale dei gas serra. Più specificamente, misura la quantità di energia assorbita da 1 tonnellata di uno specifico gas serra, in un arco temporale fissato, rispetto a quella assorbita da 1 tonnellata di CO₂ nel medesimo arco temporale. Tale modalità permette ai decisori politici di attuare misure più consapevolmente (EPA, n.d). Il GWP può essere calcolato considerando differenti archi temporali, tuttavia lo standard è rappresentato dal GWP₁₀₀ calcolato su un periodo di 100

²⁹ Ad esempio, il biossido di carbonio (CO₂) può permanere in atmosfera per centinaia o addirittura migliaia d’anni (in base al tasso di emissione rispetto al tasso di cattura). Invece, il metano ha una permanenza di un decennio circa, dopodiché decade in biossido di carbonio (Vallero, 2019).

anni (Vallero, 2019). La Tabella 1.1 riporta le capacità di riscaldamento globale di alcuni gas serra chiave.

Tabella 1.1 – Potenziale di riscaldamento globale di gas selezionati rispetto a CO₂.

Denominazione industriale o nome comune	Formula chimica	GWP ₁₀₀
Biossido di carbonio	CO ₂	1
Metano	CH ₄	28
Ossido di diazoto	N ₂ O	265
Esafluoruro di zolfo	SF ₆	23.500

Fonte: *Greenhouse Gas Protocol su dati IPCC Fifth Assesment Report (AR5), 2014*

Più è elevato il GWP, maggiore sarà la capacità dello specifico gas serra di riscaldare il pianeta rispetto al biossido di carbonio nell’arco temporale prefissato (nel caso della Tabella 1.1 100 anni) (EPA, n.d). Usando il biossido di carbonio come base, il metano, su un arco temporale di 100 anni, ha un GWP 28 volte superiore. Il GWP ancora più elevato per N₂O e SF₆, quest’ultimo con un GWP nell’ordine delle decine di migliaia di volte superiore a quello del biossido di carbonio.

1.3.2. Effetti del cambiamento climatico

Le emissioni antropiche non accennano a ridursi e, in mancanza di interventi, questo potrebbe tradursi in un aumento della temperatura nel periodo 2030-2050 fino ad 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali e all’attuale aumento di 1,1°C (ENEL, n.d). Entro la fine del secolo, le temperature potrebbero aumentare fino a 4°C (Denchak, 2022). Come dichiarato dal Prof. Pierre Friedlingstein³⁰: la scienza è chiara, le emissioni di CO₂ devono diminuire fino allo “zero netto”³¹ a livello globale per arrestare l’ulteriore riscaldamento del pianeta. Il cambiamento climatico sta interessando ogni Paese in ogni continente. Gli impatti sono sempre più visibili in ogni ecosistema (Denchak, 2022). Gli effetti³² di questo fenomeno sono ravvisabili nella composizione dell’atmosfera, anomalie metereologiche locali, condizioni metereologiche estreme quali uragani e nubifragi, ritiro e scomparsa dei ghiacciai e delle calotte polari, innalzamento del livello dei mari e degli oceani,

³⁰ Professore e Cattedra di Modellistica Matematica e del Sistema Climatico presso l’Università di Exeter e Direttore della Ricerca presso il Laboratoire de Météorologie dynamique, Centre National de la Recherche Scientifique in Francia.

³¹ In inglese *Net Zero*, si riferisce all’equilibrio tra la quantità di gas serra prodotti dalle attività umane e la quantità rimossa dall’atmosfera (IPCC, 2018).

³² Questi sono alcuni degli effetti causati dal cambiamento climatico che, per ragioni di spazio, si è deciso di riassumere nei punti principali. Seppur senza entrare nel dettaglio, la varietà di effetti scatenati dà prova della minaccia molto grave rappresentata da questo fenomeno.

acidificazione, incendi boschivi, effetti sull'agricoltura, scarsità d'acqua, variazioni del comportamento delle specie animali quali le migrazioni degli uccelli e possibili danni alla salute degli individui (Wani et al, 2013) (Commissione europea, n.d). Tra gli effetti che possiamo osservare meglio e che sono sempre più frequenti troviamo: nubifragi, ondate di calore, inondazioni e siccità. Un clima più caldo crea un'atmosfera che può raccogliere, trattenere e rilasciare più acqua, cambiando lo schema meteorologico a tal punto da rendere aree umide più umide e aree secche ancora più secche (Denchak, 2022).

È probabile che il superamento di un aumento delle temperature di 3°C causi diversi danni e catastrofi globali (Ramanathan et al, 2017). Ad esempio, ecologisti e paleontologi sostengono che un riscaldamento globale eccedente i 3°C, accompagnato da un incremento dell'acidità degli oceani a causa dell'accumulo di CO₂, possa diventare un fattore causale importante per esporre all'estinzione più del 50% di tutte le specie. Il 20% delle specie è oggi a rischio di estinzione a causa delle attività umane, della distruzione dell'habitat e dei cambiamenti climatici. Ancora, un aumento delle temperature medie di 4°C esporrà oltre il 70% della popolazione mondiale, ovvero circa 7 miliardi di persone entro la fine del secolo, a uno stress termico potenzialmente mortale ed esporrà circa 2,4 miliardi di persone a malattie trasmesse da vettori come la Dengue, la Chikengunya e il virus Zika (Ibidem).

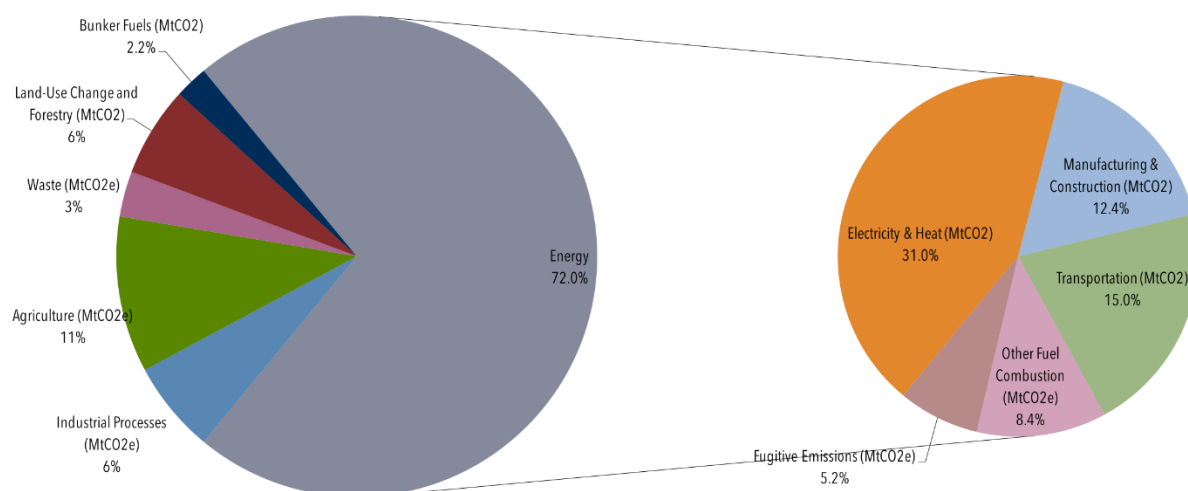
1.3.3. La responsabilità del settore energetico

Il settore energetico è fonte di circa tre quarti delle emissioni di gas serra a livello globale e detiene la chiave per evitare i peggiori effetti del cambiamento climatico, forse la più grande sfida che l'umanità abbia mai affrontato (IEA, 2021). La Figura 1.8 mostrava l'andamento delle emissioni globali annue di CO₂ associate all'utilizzo di fonti fossili; un trend in continua crescita che ha fatto registrare emissioni pari 36,7 Gt nel 2019 e una concentrazione di CO₂ nell'atmosfera in continuo aumento. La Figura 1.10 mostra i settori responsabili e il relativo contributo alle emissioni di gas ad effetto serra. Il consumo di energia è di gran lunga la maggiore fonte di emissioni di gas serra causate dall'uomo, responsabile di circa tre quarti del totale a livello globale (Ge et al., 2020). Il settore energetico include: trasporto, produzione elettrica e riscaldamento, consumi abitativi, manifattura e costruzioni, emissioni derivanti da fughe di gas e altre fonti di combustione di carburante³³ (Ibidem). Analizzando solo le principali sotto fonti, la produzione di elettricità e riscaldamento rappresenta la più

³³ Questa fonte di emissioni di gas serra si riferisce a tutte le emissioni del settore energetico che non sono direttamente associate alla produzione di produzione elettrica e riscaldamento, quali estrazioni di idrocarburi, processi di raffinazione, processi di lavorazione e trasporto (EPA, n.d).

importante fonte di emissioni a causa della combustione di carbone, gas naturale e petrolio, dunque di fonti fossili (EPA, n.d). All'interno della categoria trasporto, il contributo maggiore (pari al 75% circa) proviene dal trasporto gommato. Le emissioni infatti derivano dalla combustione di benzina e diesel per automobili, camion, autocarri, motocicli e autobus. Il 60% circa delle emissioni da mezzi gommati è causata da mezzi adibiti per il trasporto di persone (automobili, motocicli e autobus); il rimanente 40% circa proviene dal trasporto di merci (camion e autocarri) (Ritchie et al., 2020).

Figura 1.10 – Emissioni globali di gas serra di origine antropica per settore. Anno 2013.



Fonte: World Resources Institute, 2017

Al di fuori del settore energetico, altri settori/attività che meritano attenzione per il loro contributo alle emissioni di gas serra sono: l'agricoltura (11% circa), con l'allevamento animale e la coltivazione di colture; i processi industriali, in particolare il settore chimico e la produzione di cemento (6% circa); cambio d'uso del suolo (6% circa) (Ge et al., 2020) (Ritchie et al., 2020).

Da questa ripartizione emerge chiaramente la moltitudine di settori e attività che contribuiscono alle emissioni globali. Ciò significa che non esiste una soluzione unica o semplice per fronteggiare il cambiamento climatico (Ritchie et al., 2020). Concentrarsi solo su una delle cause non è sufficiente, tuttavia ci sono cause che pesano maggiormente sulla questione e che necessitano di maggiori sforzi e soluzioni. Anche per il settore energetico, che è responsabile di circa tre quarti delle emissioni, non esiste una soluzione semplice. Infatti, anche se riuscissimo a decarbonizzare totalmente la nostra fornitura di energia elettrica, dovremmo elettrificare il riscaldamento abitativo e il trasporto su strada, trovando

soluzioni anche per aviazione e trasporto marittimo che ancora non dispongono di tecnologie eco-compatibili (Ibidem).

1.3.4. *Limiti dell'efficienza energetica*

Utilizzando l'energia in maniera più efficiente, è possibile ridurre la domanda di energia, con conseguente riduzione delle bollette per i consumatori, delle emissioni di gas serra e di altri inquinanti e aumento della sicurezza energetica grazie alla riduzione delle importazioni energetiche (ERPS³⁴, 2015). In tutto il mondo, l'efficienza energetica ha dunque contribuito a migliorare il benessere degli individui e delle società (IEA, 2019). L'efficientamento energetico, pur essendo fondamentale per ricavare il massimo output da ogni unità di energia immessa, dunque teoricamente anche di massimizzare il benessere, vede dei limiti tecnicamente insuperabili: l'entropia (University of Wisconsin, n.d). Infatti, l'energia ricavata da una fonte energetica primaria non avviene mai con un rapporto 1:1, ossia l'input d'energia non è mai uguale all'output finale; vi è sempre una perdita nel processo di trasformazione. Questa perdita si manifesta sotto forma di energia termica che viene dispersa nello spazio (Ibidem). Inoltre, facendo riferimento al secondo principio della termodinamica, affinché un processo avvenga in tempi ragionevoli, è sempre richiesta una quantità di energia maggiore di quella necessaria perché il processo si compia. Questo impone necessariamente un *trade-off* con il perseguimento dell'efficienza energetica (Stern, 2010).

Oltre a quanto finora detto, vi è il rischio che si verifichi il *rebound effect* (in italiano effetto rimbalzo). Quest'ultimo è il fenomeno per cui un aumento dell'efficienza energetica può portare ad un risparmio energetico inferiore a quello che ci si aspetterebbe a causa di un aumento dei consumi, annullando gli effetti benefici attesi dagli interventi di efficientamento adottati (Gillingham et al., 2014) (ENEA, 2019). Dunque riconosciuto il ruolo potenziale dell'efficientamento energetico nel ridurre parzialmente le emissioni globali, si rende necessario che i decisori politici intervengano sul mix energetico al fine di raggiungere lo zero netto entro la metà del secolo (IEA, 2021). Questo intervento diviene fondamentale anche in vista degli aumenti attesi della domanda energetica, come trattato ad inizio capitolo.

³⁴ European Parliamentary Research Service.

1.3.5. Accordi e obiettivi contro il cambiamento climatico

Le sfide in ambito energetico con cui ogni Paese si deve misurare sono uniche e complesse, come dimostra la variabilità dei risultati nelle dimensioni del trilemma e nei fattori contestuali (Austin, 2016). Tuttavia, a rendere l'argomento critico è la natura transnazionale dei mercati energetici e delle questioni ambientali, la quale richiede una prospettiva che vada oltre il livello nazionale (Ibidem).

La crescente preoccupazione da parte della comunità scientifica riguardo ai potenziali effetti del cambiamento climatico mosse le Nazioni Unite e i suoi Stati membri nel 1992 a dotarsi di un quadro d'azione per contrastare l'incremento delle temperature: l'UNFCCC³⁵ (Falduto e Arbinolo, 2021). Si tratta di un trattato ambientale internazionale che fu sottoscritto nel medesimo anno a Rio de Janeiro in occasione della Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite, noto anche come Summit della Terra. L'obiettivo del trattato è la riduzione delle emissioni di gas serra, ritenute responsabili del riscaldamento globale. Il trattato non fissava limiti obbligatori per le emissioni ma rendeva obbligatoria la stipula di futuri protocolli che avrebbero vincolato il quantitativo di emissioni dei Paesi (Dipartimento per le Politiche Europee, n.d). Quasi tutti i Paesi (ad oggi 197) si unirono all'UNFCCC, impegnandosi a sviluppare politiche per ridurre le proprie emissioni di gas clima alternati (Falduto e Arbinolo, 2021). A partire dal 1995, i Paesi (o Parti) che aderirono alla convenzione diedero il via alle primissime negoziazioni in ambito climatico (Ibidem). Questi incontri annuali prendono il nome di COP³⁶.

Il primo grande traguardo della comunità internazionale si raggiunse nel 1997 durante la COP3 a Kyoto in Giappone. In questa occasione fu steso il Protocollo di Kyoto, il primo trattato internazionale che prevedeva un impegno concreto e giuridicamente vincolante da parte dei Paesi sviluppati a ridurre le proprie emissioni (UNFCCC, 2008). Più approfonditamente, il documento vincolava solo i Paesi sviluppati e imponeva loro un maggior onere in base al principio della "responsabilità comune ma differenziata e delle rispettive capacità", riconoscendone la maggior responsabilità degli attuali elevati livelli di emissioni di gas serra nell'atmosfera (Ibidem). Il protocollo di Kyoto richiedeva una riduzione delle emissioni del 5% rispetto ai livelli del 1990, da realizzarsi entro il 2012. La

³⁵ United Nations Framework Convention on Climate Change (in italiano Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici) (Dipartimento per le Politiche Europee, n.d).

³⁶ Conference of the Parties (in italiano Conferenza delle Parti). È l'organo direttivo di trattato internazionale. In questo caso, la convenzione di riferimento è la Convenzione Quadro delle Nazioni Unite sui Cambiamenti Climatici (Falduto e Arbinolo, 2021).

ratificazione da parte dei paesi fu un processo lento, che si compì con l'entrata in vigore solo nel 2005 (Falduto e Arbinolo, 2021) (UNFCCC, 2008).

Il successivo traguardo di rilievo si ottenne nel 2015 con la COP21 tenutasi a Parigi. In questa occasione venne stipulato l'Accordo di Parigi, un nuovo accordo sul clima per il periodo dopo il 2020 che impegnerà tutti i 195 Paesi sottoscrittori a ridurre le rispettive emissioni di gas serra (ISPRA³⁷, n.d). In tal modo è stata abrogata la distinzione di principio tra Paesi sviluppati e Paesi in via di sviluppo presente nel Protocollo di Kyoto (UFAM³⁸, 2018). L'obiettivo dell'accordo è di mantenere l'aumento della temperatura media ben al di sotto dei 2°C, possibilmente entro 1,5°C. Questo sarà possibile solo se i Paesi firmatari dell'accordo taglieranno drasticamente le proprie emissioni arrivando gradualmente, nel 2050, al *Net Zero*. Una delle novità introdotte dall'Accordo di Parigi è l'obbligo da parte dei Paesi di produrre, e di aggiornare ogni 5 anni, un *Nationally Determined Contribution* (NDC). Quest'ultimo è un piano che delinea in maniera chiara e sintetica la strategia scelta da ogni Paese per ridurre le emissioni e adattarsi ai cambiamenti climatici (Commissione europea, n.d) (Falduto e Arbinolo, 2021).

Oltre ai principali accordi appena discussi, merita una menzione l'Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile. Si tratta di un programma d'azione per le persone, il pianeta e la prosperità a livello globale sottoscritto nel 2015 dai Paesi membri delle Nazioni Unite (ONU, 2015). Questo contiene 17 Obiettivi per lo Sviluppo Sostenibile (OSS, in inglese SDGs, *Sustainable Development Goals*) in un programma costituito da 169 "target" o traguardi. Gli OSS hanno validità universale, ossia tutti i Paesi devono fornire un contributo per raggiungere i traguardi fissati in base alle loro capacità e si impegnano a raggiungerli entro il 2030 (AICS³⁹, n.d) (ONU, 2015).

Ai fini di questa trattazione, assumono rilievo gli OSS 7 (Garantire l'accesso all'energia a prezzo accessibile, affidabile, sostenibile e moderna per tutti) e 13 (Adottare misure urgenti per combattere i cambiamenti climatici e le loro conseguenze), i quali sono strettamente correlati e complementari (IEA et al., 2019). Vi è il riconoscimento, all'interno dall'Agenda 2030, del ruolo centrale che l'energia svolge per quasi tutte le sfide e le opportunità più importanti che si stagliano all'orizzonte. Che si tratti di sicurezza, produzione alimentare, lavoro, aumento dei redditi o cambiamento climatico, l'accesso all'energia è essenziale (ONU, n.d).

³⁷ Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.

³⁸ Ufficio Federale dell'Ambiente.

³⁹ Agenzia Italiana per la Cooperazione e lo Sviluppo.

In questo contesto, è fondamentale che i governi riescano a comunicare gli obiettivi e le motivazioni sottostanti le politiche ambientali approvate per ottenere il sostegno popolare e facilitare la transizione energetica. Ciò richiederà un linguaggio comune. Infatti, è proprio l'accettazione sociale la sfida più grande nel processo di transizione energetica (Ibidem).

Per concludere, bilanciare il trilemma energetico non è una questione semplice, né per i singoli Paesi né a livello globale. Le ragioni sono legate alla disponibilità di fonti energetiche, a fattori politici e ad altre priorità di natura socio-economica (Sloss e Loria, 2020). La crescita della popolazione mondiale richiederà sempre di più un approvvigionamento costante e sostenibile di energia. Contestualmente, i governi devono trovare soluzioni per soddisfare la domanda implementando soluzioni a basso costo e a basso impatto ambientale (Ibidem). Nonostante gli accordi e gli impegni sottoscritti, la crisi climatica continua senza sosta mentre la comunità globale si sottrae al pieno impegno necessario per mitigarla ed invertirla (ONU, n.d). La sfida climatica è essenzialmente una sfida energetica, e porterà i decisori politici a dover ripensare alle fonti energetiche disponibili e alle tecnologie da mettere in campo per compiere la transizione verso un'economia climaticamente neutrale (IEA, 2021).

Capitolo 2

2. *Fonti energetiche: un confronto*

La valutazione complessiva di una fonte energetica non si basa solo su quanto sia pulita; deve anche essere affidabile, accessibile e conveniente (Pitt, 2018). Ciò è coerente con quanto trattato nel primo capitolo e porta a introdurre un concetto: il mix energetico. Quest'ultimo rappresenta l'insieme di fonti e tecnologie di generazione di energia disponibili in un determinato momento in un'area specifica, solitamente un Paese (CFR⁴⁰, n.d). Ogni Paese può decidere autonomamente quale tecnologia di produzione energetica utilizzare in base alle proprie esigenze, alle proprie possibilità finanziarie, alla disponibilità locale di materie prime e agli obiettivi ambientali da raggiungere (Ibidem). Per valutare le opzioni disponibili, è utile che vi sia comprensione a livello socio-politico delle caratteristiche delle differenti fonti e tecnologie energetiche e sui *trade-off* che ciascuna presenta (Pitt, 2018), considerandone vantaggi e svantaggi (CFR, n.d). Il seguente capitolo mira a presentare e a confrontare le principali fonti energetiche e tecnologie che possono essere inserite nel mix energetico nazionale.

2.1. *Non rinnovabili e rinnovabili: una macro distinzione*

È importante fare una distinzione tra due tipologie di fonti energetiche: fonti non rinnovabili e fonti rinnovabili. Le fonti energetiche non rinnovabili, dette anche fossili, sono rappresentate da petrolio, carbone, gas naturale e uranio (quest'ultima non fossile) (Koyama, 2017) (EIA, n.d). Il carattere non rinnovabile è dovuto al fatto che queste fonti di energia sono presenti in quantità finite e si esauriscono con l'utilizzo e consumo della risorsa (Ciccioli e Ragni, 2016). Infatti, queste risorse naturali necessitano di tempi geologici per rinnovarsi (Dunham, 1974). Al contrario, le fonti energetiche rinnovabili sono definite tali poiché il loro sfruttamento non compromette, né intacca né dissipa le risorse naturali dalle quali si ricava energia e si ricostituiscono dopo ogni ciclo di utilizzo (IREN, 2022). Le fonti energetiche rinnovabili sono di tre tipologie: l'energia solare (ad esempio l'energia fotovoltaica ed eolica⁴¹), l'energia gravitazionale (ad esempio l'energia idroelettrica) e l'energia geotermica (ad esempio l'energia geotermoelettrica) (Belyakov, 2019).

⁴⁰ Council on Foreign Relations.

⁴¹ L'energia eolica è un sottoprodotto del sole. Il riscaldamento irregolare dell'atmosfera da parte del sole, le superfici irregolari della terra (montagne e valli) e la rivoluzione del pianeta intorno al sole si combinano per creare il vento (EERE. Office of Energy Efficiency & Renewable Energy, n.d).

Tabella 2.1. - Consumi mondiali di fonti energetiche primarie (2019) espressi in EJ⁴² e (%).

Petrolio	Gas Naturale	Carbone	Nucleare	Rinnovabili	Totale
193 (33,1%)	141,5 (24,2%)	157,9 (27%)	24,9 (4,3%)	66,6 (11,4%)	583,9 (100%)

Fonte: BP, 2020

Prendendo in analisi la Tabella 2.1 dei consumi mondiali di fonti energetiche primarie, si coglie immediatamente come le fonti fossili, in particolar modo petrolio, gas naturale e carbone, soddisfino il fabbisogno energetico mondiale per oltre l'80% dei consumi. Più residuale risulta, invece, il ruolo delle fonti energetiche rinnovabili, il cui contributo maggiore è rappresentato dall'energia idroelettrica che ammonta al 6,4% del totale dei consumi mondiali, e dal nucleare.

Oltre alla distinzione tra fonti non rinnovabili e rinnovabili, può essere effettuata una distinzione tra fonti di energia primaria e secondaria. Ciò che caratterizza le fonti primarie è la possibilità di utilizzo diretto della risorsa così come la si ritrova in natura (Øvergaard, 2008). Sono fonti primarie tutte le fonti fossili e le rinnovabili (solare, gravitazionale e geotermica) espresse nella Tabella 2.1. Sono fonti secondarie, invece, quelle che derivano dalla trasformazione o raffinazione delle fonti primarie. Ad esempio, l'energia elettrica viene prodotta nelle centrali elettriche, impianti la cui attività consiste nel trasformare l'energia primaria in energia elettrica. Un ulteriore esempio è rappresentato dalla benzina, derivato del petrolio grezzo ottenuto tramite un processo di raffinazione (Ibidem).

2.2. Il petrolio

Dalla metà degli anni '50, il petrolio è diventato la più importante fonte di energia al mondo, tanto da poter essere considerata la linfa vitale dei Paesi industrializzati (UKOG⁴³, n.d). La Tabella 2.1 mostra infatti come il petrolio svetti su tutte le fonti energetiche primarie, contribuendo per un terzo ai consumi mondiali di energia primaria. Il consumo mondiale di petrolio nel 2019 è stato pari a 100,37 milioni di barili⁴⁴ al giorno (EIA, 2022). Oltre a questi dati, l'importanza di tale risorsa può essere colta anche dalla seguente affermazione della Independent Petroleum Association of America (IPAA):

“È la fonte di energia che ha dominato il XX secolo e continuerà ad essere fondamentale anche nella prima metà del XXI secolo. È la fonte energetica più

⁴² Exajoule. 10¹⁸ joules. (BP, n.d)

⁴³ UK Oil & Gas PLC.

⁴⁴ Un barile è pari a circa 159 litri (BP, n.d).

versatile ad oggi disponibile. È la più politica delle fonti energetiche; la risorsa che spinge i Paesi a farsi la guerra; la risorsa che i Paesi devono avere per fare la guerra. È la più importante merce del commercio internazionale ed una delle più volatili” (IPAA, 2001).

In tutto il mondo, la vita delle persone e il destino delle nazioni sono probabilmente determinati dai risultati delle operazioni dell'industria petrolifera (Lalude, 2015). Il petrolio non esaurisce la sua importanza nell'ambito energetico. Infatti, quasi tutto ciò che ci circonda contiene, direttamente o indirettamente, derivati del petrolio: dai giocattoli alle fibre tessili, dai mobili alle vernici e persino medicinali e prodotti cosmetici (Confindustria Energia, n.d). In particolare, l'industria della plastica è fortemente collegata alla produzione di fonti fossili, dunque anche al petrolio (CIEL⁴⁵, n.d).

2.2.1. Formazione, composizione e lavorazione

Il petrolio è un combustibile fossile e una fonte energetica non rinnovabile, così come il carbone e il gas naturale (ENI, 2011). Si tratta di una miscela di idrocarburi che si è formata dalla trasformazione di resti di animali e piante (in particolare diatomee⁴⁶) vissuti milioni di anni fa in ambiente marino e che hanno accumulato, come accade oggi, l'energia proveniente dal Sole (ENI, 2011) (EIA, 2022). Nel corso di milioni di anni, la materia organica proveniente da questi organismi morti è stata coperta da strati di sabbia, limo e roccia (EIA, 2022) (National Geographic, n.d). Questi strati di fango ricchi di materia organica (noti come “roccia madre”) sprofondano lentamente sotto il peso di nuovi strati di sedimenti. Raggiunte profondità e temperature specifiche, la materia organica si trasforma in “kerogene” e poi in idrocarburi veri e propri. Tale processo può durare dai 10 ai 100 milioni di anni in base alla temperatura e pressione a cui viene sottoposta la roccia madre (ENI, 2011). Da questa trasformazione si formano i combustibili fossili che oggi consumiamo, dunque petrolio, carbone e gas naturale (EIA, 2022).

Una volta formato il petrolio, la sostanza, compressa dal peso dei sedimenti soprastanti, viene fatta scorrere fuori dalla roccia madre (ENI, 2011). Inizialmente, si sposta attraverso le micro-fratture della roccia madre (migrazione primaria) e poi nelle aperture delle rocce permeabili adiacenti (migrazione secondaria). A questi spostamenti può seguire una dispersione dalla superficie terrestre oppure un blocco e accumulo causato da rocce

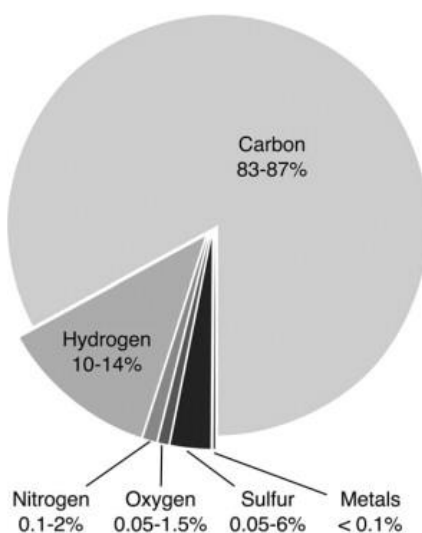
⁴⁵ Center for International Environmental Law.

⁴⁶ Le diatomee sono alghe brune, unicellulari, eucariotiche, generalmente delle dimensioni di pochi μm (ISPRA, n.d)

impermeabili. In quest'ultimo caso, l'accumulo di petrolio intrappolato porta alla formazione di un giacimento, che può essere o meno economicamente sfruttabile. Al petrolio convenzionale si affiancano anche le risorse presenti nelle sabbie, scisti e argille bituminose, definite anche fonti non convenzionali⁴⁷ (Ibidem).

Dal punto di vista chimico (Figura 2.1), il petrolio è formato prevalentemente da idrogeno e carbonio. In via residuale presenta anche piccole percentuali di ossigeno, azoto, zolfo e tracce di metalli, quali vanadio, cobalto e nichel. I composti organici comuni includono alcani (paraffine), nafteni, composti aromatici e eterociclici (Selley, 2003).

Figura 2.1 – Composizione chimica del petrolio.

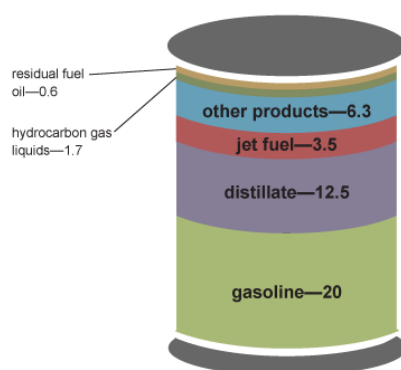


Fonte: Stauffer et. al, 2008

Una volta estratto, il petrolio greggio viene inviato ad una raffineria dove le sue diverse parti vengono separate in prodotti petroliferi utilizzabili. Questi prodotti petroliferi comprendono: la benzina, i distillati quali gasolio e gasolio per il riscaldamento, i carburanti per aerei (cherosene), le materie prime petrolchimiche, le cere, i lubrificanti e l'asfalto (EIA, 2022) (Denchak, 2022). La Figura 2.2 mostra come è stata mediamente ripartita la produzione dei prodotti petroliferi nel 2021. Al di là del dato medio, la quantità di singole materie prodotte varia da un mese all'altro e da un anno all'altro, in quanto le raffinerie adeguano la produzione per soddisfare la domanda del mercato e massimizzare la redditività (Ibidem).

⁴⁷ Si definiscono tali le risorse il cui sfruttamento comporta l'applicazione di specifiche tecnologie di estrazione (Treccani, n.d).

Figura 2.2 – Prodotti petroliferi ottenuti dalla raffinazione di un barile di petrolio nel 2021. Dato espresso in galloni (1 barile = circa 42 galloni).



Fonte: EIA, 2022

2.2.2. Risorsa conveniente e radicata

Il maggior punto di forza del petrolio come fonte energetica è la sua forma liquida, che lo rende economicamente conveniente da trasportare oltre che di facile gestione (Koyama, 2017). Grazie alle economie di scala, generate da uno sviluppo delle infrastrutture avvenuto nel corso dei decenni (DOE⁴⁸, 2015), consumatori e fornitori possono contare su forniture flessibili e abbondanti della materia prima con un costo di estrazione relativamente basso ed un prezzo di consumo relativamente conveniente (DOE, 2015) (Koyama, 2017) (Stevens, 2018). Inoltre, ha una densità energetica apprezzabile se paragonata con quella di altre fonti energetiche (Tabella 2.2) (Stevens, 2018).

Tabella 2.2 – Potere calorifico medio netto dei principali combustibili. In giallo petrolio e derivati.

Combustibile	Potere calorifico medio netto
Petrolio greggio	42 MJ ⁴⁹ /kg
Benzina	45 MJ/kg
Diesel	43 MJ/kg
GPL	46 MJ/kg
Cherosene	45 MJ/kg
Olio combustibile	41 MJ/kg
Metano	54 MJ/kg
Carbone (litantrace bituminoso) ⁵⁰	28 - 31 MJ/kg
Legna	16 MJ/kg
Uranio 235	86.400.000 MJ/kg

Fonte: IEA et al., 2004 e European Nuclear Society, n.d

⁴⁸ US Department of Energy.

⁴⁹ Un MJ è equivalente a 10⁶ Joule. 1 MJ è pari a 239 Kcal circa (Staffell, 2011).

⁵⁰ Tra le diverse qualità di carbone, si è scelto il litantrace bituminoso per la sua abbondanza, elevata diffusione e utilizzo per la generazione di energia elettrica (Treccani, n.d).

Il potere calorifico è la quantità di energia sprigionata nella combustione completa di un'unità di peso o di volume di un combustibile (ENEA, n.d). La Tabella 2.2 mostra alcuni tra i principali combustibili e il loro potere calorifico medio netto. La ragione per cui si è deciso di inserire non solo il petrolio ma anche i suoi derivati (in giallo), è dovuta al fatto che il petrolio greggio, così come viene estratto dal suolo, è una materia prima con un utilizzo limitato (IEA et al., 2004). Anche se può essere utilizzato come combustibile, il vero potenziale del petrolio si raggiunge quando viene raffinato in diversi prodotti che saranno utili al consumatore finale per scopi specifici (es. la benzina per i trasporti). L'obiettivo della raffinazione è di apportare un valore aggiunto a questa materia prima, in quanto l'insieme dei prodotti raffinati ha un valore più elevato rispetto alla materia prima di partenza (Ibidem). La Figura 2.3 evidenzia sinteticamente l'enorme quantità di prodotti derivati dal petrolio che utilizziamo tutti i giorni.

Figura 2.3 – Derivati del petrolio.

PRIMARY OIL PRODUCTS	Crude oil	
	Natural gas liquids	
	Other hydrocarbons	
SECONDARY PRODUCTS INPUTS TO REFINERY	Additives/blending components	
	Refinery feedstocks	
SECONDARY OIL PRODUCTS	Refinery gas	Transport diesel
	Ethane	Heating and other gasoil
	Liquefied petroleum gases	Res. fuel: low-sulphur content
	Naphtha	Res. fuel: high-sulphur content
	Aviation gasoline	White spirit + SBP
	Gasoline type jet fuel	Lubricants
	Unleaded gasoline	Bitumen
	Leaded gasoline	Paraffin waxes
	Kerosene type jet fuel	Petroleum coke
	Other kerosene	Other products

Fonte: IEA et al., 2004

Nella dicitura “altri prodotti” presente nella tabella, si evidenzia come il petrolio sia molto più di una semplice fonte energetica e di un combustibile per trasporti (Service, 2019). Al di là di costituire un combustibile versatile per tutti i mezzi di trasporto, dalle auto al trasporto pesante gommato, dagli aerei alle navi, il petrolio intride la nostra realtà, con migliaia di oggetti della vita di tutti i giorni che contengono componenti con suoi derivati (Turgeon e Morse, 2022) (Wintershall Dea, n.d). Quasi il 90% dei prodotti chimici contiene petrolio come materia prima, soprattutto le materie plastiche. Ma il petrolio non è solo nella plastica: dalla produzione di aspirina e altri farmaci, dai pesticidi ai fertilizzanti, dalle vernici ai cosmetici, il petrolio greggio è una materia prima per la quale non esistono ancora alternative adeguate (Wintershall Dea, n.d). La sfida per gli scienziati e le aziende sarà ottenere gli stessi composti finali e trovare alternative che si sostituiscano al petrolio (Service, 2019).

L'attuale insostituibilità del petrolio non si ha solo nel settore petrolchimico ma anche in quello del trasporto pesante (Wintershall Dea, n.d). Al giorno d'oggi, solo il petrolio e derivati possono fornire l'energia necessaria per il trasporto pesante, dove carichi pesanti devono percorrere lunghe distanze. Dal trasporto gommato a quello navale e aereo, finché non saranno sviluppate tecnologie eco-compatibili idonee, solo carburanti a base di petrolio con un'elevata autonomia potranno raggiungere questo obiettivo (Ibidem).

Infine, come anticipato a inizio paragrafo, la forma liquida, e dunque la facilità di stoccaggio, e la flessibilità sono alla base dell'apprezzamento di questa fonte energetica (Koyama, 2017). Basti pensare all'utilizzo di generatori a diesel nelle case, scuole e ospedali situati in zone remote. Anche durante le emergenze, quando la rete elettrica è interrotta, i generatori a diesel salvano vite umane fornendo l'elettricità agli ospedali e ai complessi residenziali che altrimenti sarebbero “al buio” (Turgeon e Morse, 2022). I vantaggi sopra esposti, connessi alle applicazioni di questa fonte energetica, fanno sì che l'era del petrolio non sia neanche lontanamente vicina a finire (Wintershall Dea, n.d).

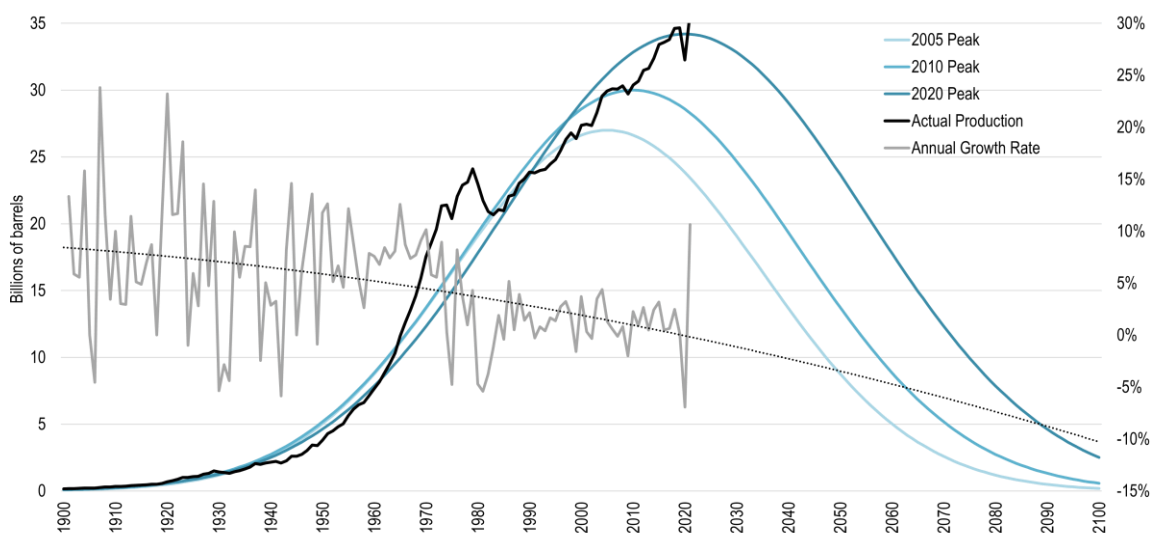
2.2.3. Una risorsa finita, inquinante e geopoliticamente rischiosa

L'immensa crescita economica globale degli ultimi decenni non sarebbe stata tale senza il petrolio greggio. È stato e continua ad essere la fonte energetica per il progresso e la prosperità (Wintershall Dea, n.d). Le caratteristiche merceologiche e gli innumerevoli utilizzi del petrolio appena esposti ne confermano il ruolo di promotore di sviluppo e di benessere. Tuttavia questo benessere viene ad un caro prezzo: l'utilizzo del petrolio, e delle

fonti fossili in generale, comporta un enorme tributo all'umanità e all'ambiente, dal riscaldamento globale all'inquinamento dell'ambiente (Denchak, 2022).

Il primo problema legato all'utilizzo del petrolio è che si tratta di una risorsa energetica non rinnovabile, e le riserve mondiali di petrolio non saranno sempre sufficienti a soddisfarne la domanda. Questo vorrà dire raggiungere il *peak oil*⁵¹, il punto di massima produzione globale (Turgeon e Morse, 2022). Ad un certo punto, il petrolio raggiungerà un livello di produzione massimo. Oggi consumiamo circa quattro volte il petrolio che scopriamo (El Bassam, 2021). Un tempo si ragionava nel seguente modo: le riserve sono finite, è noto dove si trovano e verranno esaurite. Tuttavia, grazie alle innovazioni tecnologiche, si continua a trovare nuovi giacimenti di petrolio recuperabili e il picco potrebbe non verificarsi prima di un decennio o più (Ibidem). Ad esempio l'utilizzo di tecniche d'estrazione non convenzionali (petrolio non convenzionale) aumenta il numero di riserve economicamente sfruttabili e dunque aumenta la risorsa a disposizione (Yildiz, 2018). L'incertezza su quando si verificherà il picco del petrolio si ravvisa nella Figura 2.4.

Figura 2.4 – Produzione mondiale annua di petrolio (1900-2021) e picchi del petrolio ipotizzati (scenari 2005-2020). A sinistra miliardi di barili annui prodotti. A destra variazioni percentuali annue nella produzione di petrolio.



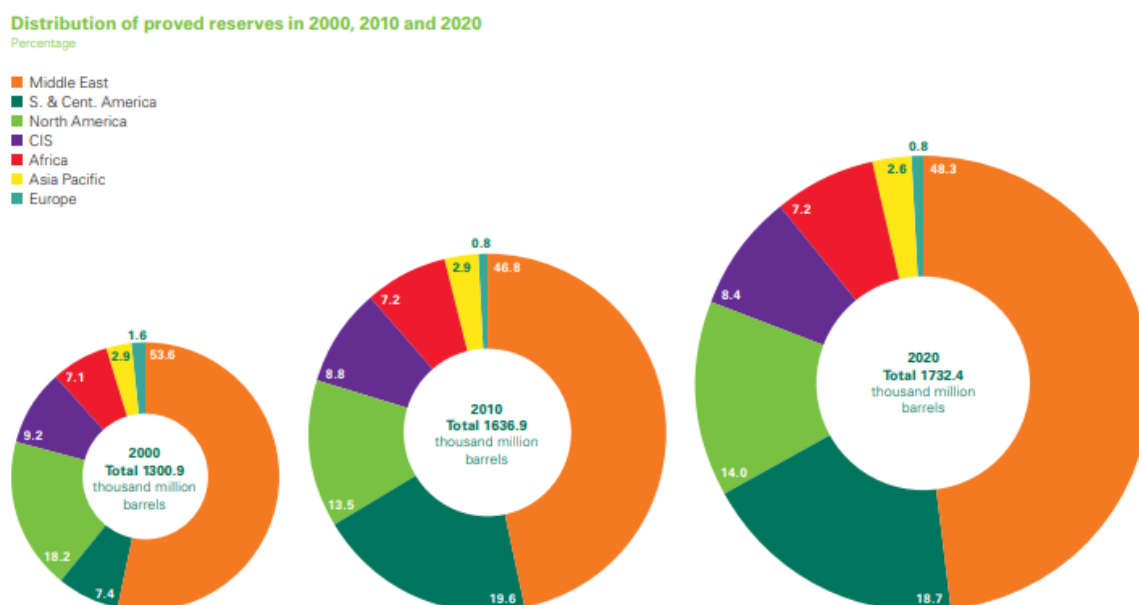
Fonte: Rodrigue, 2022. Adattamento di dati BP Statistical Review of World Energy.

⁵¹ Il *Peak Oil* (in italiano picco del petrolio), basato sulla teoria di M.K. Hubbert, è definito come il momento in cui viene raggiunto il tasso massimo di estrazione del petrolio greggio, dopo il quale si prevede che l'estrazione entrerà in declino definitivo. La teoria del picco del petrolio si basa sull'aumento, il picco, la diminuzione e l'esaurimento del tasso di produzione aggregato dei giacimenti petroliferi nel corso del tempo (Yildiz, 2018). La teoria si applica a qualsiasi risorsa finita (El Bassam, 2021).

Il concetto di picco del petrolio può essere dedotto dalle riserve petrolifere globali, ma con molta incertezza (Rodrigue, 2022). Il quadro temporale in cui si prevede che la produzione di petrolio raggiunga il picco è oggetto di un ampio dibattito. La International Energy Agency (IEA) ha dichiarato che il picco non si verificherà prima del 2030 circa, mentre altri esperti sostengono che potrebbe verificarsi prima. Secondo le ipotesi precedenti, gli scenari di picco (Figura 2.4) del 2005 e del 2010 non si sono verificati (30 miliardi di barili all'anno). Uno scenario di picco petrolifero del 2020 collocava il picco a 35 miliardi di barili, non raggiunto a causa della pandemia di Covid-19, e comunque superato nel 2018 e 2021 (Ibidem). Il concetto di picco del petrolio, benché logico e fondato, rimane finora elusivo, ma inevitabile. Dopo tale punto, la produzione subirà un declino forzato e i costi della materia prima rimanente aumenteranno (Turgeon e Morse, 2022).

Le riserve petrolifere provate a livello globale erano pari a 1.732 miliardi di barili alla fine del 2020 (BP, 2021). La Figura 2.5 mostra dove sono localizzate le riserve petrolifere provate a livello mondiale ed evidenzia un aspetto che è utile tenere in considerazione nel momento in cui si decide di inserire una quota considerevole di petrolio nel proprio mix energetico: il petrolio, come altre risorse energetiche e non, è distribuito in modo disomogeneo e sono pochi i Paesi e le aree geografiche dotate di risorse petrolifere abbondanti (Lalude, 2015). Questo implica necessariamente dipendere da Paesi produttori, laddove non si avessero risorse petrolifere significative, esponendosi a rischi di natura geopolitica e mettendo a rischio la sicurezza energetica nazionale (DOE, 2015). Il potere politico conferito dal petrolio risiede non solo dalla distribuzione geologica della risorsa ma anche dal fatto che tali risorse sono spesso inquadrare come proprietà degli Stati, e dunque spesso gestite con finalità che esulano da quelle perseguite da aziende e privati (Winter, 2016).

Figura 2.5 – Distribuzione delle riserve petrolifere provate nel mondo. Periodo 2000-2020.



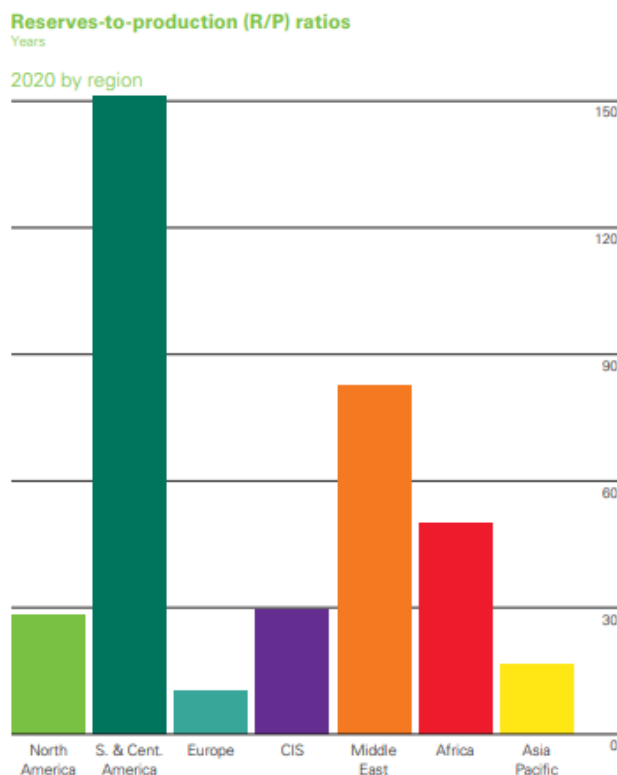
Fonte: BP, 2021

Osservando la Figura 2.5, è possibile notare immediatamente la disomogeneità nella localizzazione geografica delle riserve provate. In particolare, nel medio oriente sono situate quasi la metà di tutte le riserve provate. Questo conferisce un enorme potere ai Paesi con riserve, soprattutto se cospicue, e permette loro di capitalizzare le paure legate alle limitazioni dell'accesso al petrolio, con il rischio che accenda tensioni politiche se non addirittura “guerre per le risorse” (Winter, 2016). Esemplare è il caso della crisi petrolifera del 1973-74⁵² (Ibidem). Al giorno d'oggi, i Paesi con le riserve maggiori sono: Venezuela (17,5%), Arabia Saudita (17,2%) e Canada (9,7%) (BP, 2021).

Il concetto di *peak oil* si basa sul rapporto riserve/produzione (R/P) (Turgeon e Morse, 2022). Il rapporto R/P globale stima che le riserve di petrolio nel 2020 sono sufficienti per soli altri 50 anni circa al ritmo di produzione attuale (BP, 2021). La Figura 2.6 mostra visivamente il rapporto R/P dei diversi Paesi/aree geografiche al rispettivo ritmo di produzione.

⁵² Il 6 ottobre 1973, allo scoppio della guerra tra Egitto e Israele, i Paesi arabi membri dell'OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries) – organizzazione fondata dai Paesi produttori di petrolio con l'accordo tra Arabia Saudita, Kuwait, Iran, Iraq e Venezuela, a cui successivamente si aggiunsero Qatar, Emirati Arabi Uniti, Libia, Algeria, Nigeria, Indonesia, Ecuador e Gabon – in sostegno di Siria ed Egitto, decisero un aumento del prezzo del petrolio a livello globale e la diminuzione delle esportazioni del 25%. Il prezzo del petrolio nel giro di pochi mesi quadruplicò. A questa misura, si decise un embargo nei confronti dei Paesi maggiormente filoisraeliani, ossia Stati Uniti e l'Olanda (Treccani, n.d) (*La prima crisi energetica del dopoguerra*, 2022).

Figura 2.6 – Rapporto R/P all'attuale ritmo di produzione dei Paesi/aree geografiche di produzione. Dato espresso in anni di produzione rimanenti.



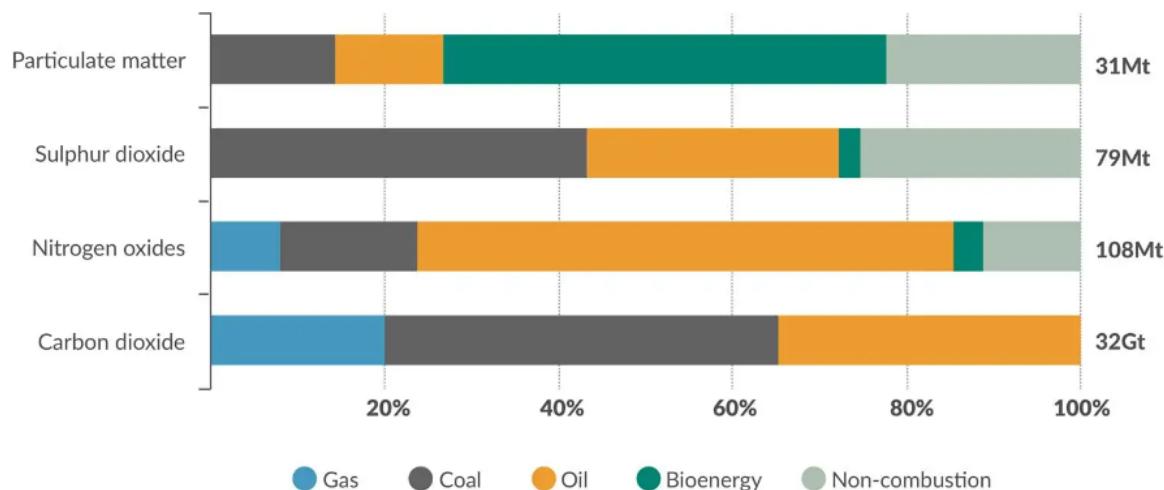
Fonte: BP, 2021

Al di là della scarsità della risorsa e alla delicatezza dei rapporti geopolitici associati allo scambio della materia prima, l'utilizzo del petrolio danneggia fortemente l'ambiente, rilasciando gas tossici ed elevate quantità di CO₂ che contribuiscono al riscaldamento globale e ad inquinare acque ed ecosistemi (Denchak, 2022) (Turgeon e Morse, 2022).

Nel 2019, le emissioni di CO₂ globali derivanti dalla combustione di fonti fossili ammontavano a quasi 37 Gt. Il petrolio, che ha fornito il 33% del fabbisogno energetico mondiale di quell'anno, è stato responsabile del 34% delle emissioni di CO₂, pari a circa 12,8 Gt (IEA, 2021). Tuttavia, il biossido di carbonio non è l'unica emissione da tenere in considerazione. La combustione delle fonti fossili genera altre emissioni nocive, quali gli

ossidi di zolfo (SO_x), in particolare il biossido di zolfo⁵³ (SO₂), gli ossidi di azoto⁵⁴ (NO_x) e particolato (PM⁵⁵ 10 e PM 2,5). La figura 2.7 illustra la quota di emissioni da attribuire all'utilizzo delle principali fonti fossili e biomassa.

Figura 2.7 – Quote di emissioni attribuibili alle fonti energetiche rispetto al totale delle principali emissioni inquinanti (anno 2016).



Fonte: International Gas Union su dati IEA World Energy Outlook 2017

Analizzando le percentuali esposte nella Figura 2.7, si evidenzia il contributo del petrolio nella generazione di emissioni nocive e che contribuiscono al riscaldamento globale. Tra le principali fonti fossili, il petrolio è la seconda fonte di emissioni sia di biossido di carbonio, sia di biossido di zolfo. La maggior parte delle emissioni di ossidi di azoto è attribuibile ai prodotti petroliferi (in particolare il gasolio) utilizzati nel settore dei trasporti: molti gas di

⁵³ Il biossido di zolfo è un gas incolore dall'odore pungente e si discioglie molto facilmente in acqua. Il biossido di zolfo presente nell'aria proviene principalmente dalla combustione di carbone e petrolio e dalle eruzioni vulcaniche. Bruciore del naso e della gola, difficoltà respiratorie e ostruzioni delle vie aeree sono i sintomi associati ad un'esposizione prolungata all'inquinante. I soggetti più a rischio di sviluppare sintomi sono i bambini (ATSDR, 1999). Oltre a problemi per la salute, il biossido di zolfo è alla base del fenomeno delle piogge acide. La sostanza, reagendo con l'atmosfera, porta alla formazione di precipitazioni più acide (ph tra 4.2-4.4 anziché 5.6) che causano danni alla vegetazione e agli edifici (Nunez, 2019).

⁵⁴ Gli ossidi di azoto tossicologicamente più significativi sono l'ossido di azoto (NO) e il biossido di azoto (NO₂). Entrambi sono gas non infiammabili e sono incolori o marroni a temperatura ambiente. L'NO è un gas dolce a acuto mentre l'NO₂ ha un odore forte e aspro. Gli ossidi di azoto presenti nell'aria possono irritare occhi, naso gola e polmoni, causando eventualmente tosse, fiato corto, stanchezza e nausea (ATSDR, 2002). Anche gli ossidi di azoto sono responsabili della formazione delle piogge acide (Nunez, 2019).

⁵⁵ Il particolato è costituito da un insieme di sostanze solide e di sostanze liquide vaporizzate. L'emissione è in parte diretta e in parte si forma quando gli inquinanti emessi da varie fonti reagiscono nell'atmosfera. Il PM può assumere diverse dimensioni: quello con dimensioni inferiori ai 10 micrometri costituisce un grave rischio per la salute in quanto è in grado di entrare nei nostri polmoni. Il PM 2,5 è il più pericoloso in quanto le particelle hanno un diametro inferiore ai 2,5 micrometri (EEA, n.d). I danni alla salute possono essere di natura polmonare e cardiaca, mentre a livello ambientale, il particolato depositandosi può modificare la composizione chimica di acque, terreni e dell'aria (EPA, 2022).

scarico di auto e camion sono emessi in ambiente urbano a livello stradale, il che ha un forte impatto sulla qualità dell'aria urbana e sulla salute pubblica (IEA, 2017).

Un ulteriore aspetto negativo derivante dall'estrazione e trasporto di petrolio è quello relativo alle perdite e fuoriuscite di petrolio (Denchak, 2022). Queste fuoriuscite possono essere di diversa estensione. Per ragioni legate alle normative e ai costi di responsabilità, la frequenza e il volume delle fuoriuscite di petrolio da parte delle industrie petrolifere sono diminuiti tra il 1970 e il 2000, in particolare quelle causate dalle petroliere, grazie al miglioramento della prevenzione (Litman, 2013) Tuttavia, continuano a verificarsi ogni anno numerose fuoriuscite di petrolio, anche di grandi dimensioni (1.000 tonnellate e oltre). Questo indica che, nonostante gli sforzi per ridurre al minimo gli incidenti, le fuoriuscite di petrolio continuano a verificarsi. Ciò che preoccupa è che per ogni grande grande fuoriuscita di petrolio ci sono probabilmente decine o centinaia di fuoriuscite più piccole, tra cui le perdite di serbatoi di stoccaggio e smaltimento incauto di olio esausto da parte dei meccanici. La regolarità di queste fuoriuscite, nonostante gli sforzi di prevenzione, suggerisce che queste, e il conseguente inquinamento dell'ambiente, sono in una certa misura un risultato inevitabile della produzione e della distribuzione del petrolio e dei suoi derivati (Ibidem).

La popolazione animale è tra le principali vittime delle fuoriuscite di petrolio nell'oceano che, galleggiando sull'acqua, crea danni all'ecosistema (Turgeon e Morse, 2022). Ad esempio, il petrolio distrugge la capacità impermeabilizzanti delle piume, esponendo gli uccelli alle fredde acque dell'oceano e al rischio di morire di ipotermia. Anche i pesci e i mammiferi marini sono minacciati dalle fuoriuscite di petrolio, le cui ombre dal basso possono essere scambiate per cibo. Il petrolio ingerito può causare danni agli organi interni ed essere ancora più tossico per chi sta a monte nella catena alimentare, un processo chiamato bioaccumulo (Ibidem).

Infine, l'ultimo rischio per l'ecosistema, e per le falde acquifere in particolare, è costituito dall'utilizzo delle tecniche del *fracking*⁵⁶ e *acidizing*⁵⁷ (Denchack, 2022). I fluidi tossici utilizzati da queste tecniche non convenzionali per l'estrazione di petrolio (e anche del gas

⁵⁶ La fratturazione idraulica, o *fracking*, è un metodo di perforazione utilizzato per estrarre petrolio o gas naturale. Nel processo di *fracking*, le fessure all'interno e al di sotto della superficie terrestre vengono aperte e allargate iniettando acqua, sostanze chimiche e sabbia ad alta pressione. Le risorse estratte con questa tecnica sono gli idrocarburi non convenzionali quali "*tight oil*" e "*tight gas*". Sono definiti tali in quanto queste sacche di combustibili fossili sono intrappolate in formazioni rocciose di scisto (Zuhlke, 2022).

⁵⁷ L'*acidizing* consiste nel pompare acido in un pozzo in una formazione geologica in grado di produrre petrolio e/o gas naturale. Lo scopo è quello di migliorare la produttività o l'iniettività di un pozzo. Il principale acido usato in questa pratica è l'acido cloridrico (HCl) (API, 2014).

naturale) possono essere cariche di metalli pesanti, materiali radioattivi e altri inquinanti. Molto spesso queste acque reflue contaminano le falde acquifere con inquinanti responsabili di cancro, difetti congeniti, danni neurologici e molto altro (Ibidem).

Per concludere, negli anni '50 e '60, gli uomini hanno accettato l'idea che il petrolio sarebbe sempre stato presente; tuttavia oggi il quadro complessivo è molto chiaro, ed è necessario implementare fonti energetiche rinnovabili e meno inquinanti per sostenere la società (Doble e Kruthiventi, 2007). Sebbene l'utilizzo del petrolio presenti svariati punti a sfavore, la mancanza di sostituti nel breve termine per la petrolchimica e per il trasporto pesante gommato, aereo e navale fa sì che la fine dello sfruttamento economico del petrolio sia ancora lontana (Serrao, 2018) (Wintershall Dea, n.d).

2.3. *Il gas naturale*

Con una crescita nei consumi nel periodo 2009-2019 del 35,9% (BP, 2020), il gas naturale è oggi una delle fonti energetiche a più rapida crescita. Nell'ultimo decennio ha contribuito per quasi un terzo alla crescita della domanda energetica, più di qualsiasi altra fonte energetica (IEA, 2022). Nel 2019, il gas naturale rappresentava la terza fonte energetica primaria, soddisfacendo per il 24% circa il fabbisogno energetico mondiale (BP, 2020).

Il gas naturale è l'idrocarburo più pulito (Shell, n.d). È una fonte energetica abbondante e versatile e contribuisce a soddisfare la crescente domanda di energia a livello globale affiancando e supportando le fonti di energia rinnovabili (Ibidem). Infatti, il gas naturale è apprezzato in quanto sembrerebbe distinguersi come combustibile di transizione, per la sua economicità rispetto alle tecnologie rinnovabili emergenti, e per i suoi effetti meno inquinanti rispetto ad altri combustibili fossili (in particolare il carbone) (Gürsan e de Gooyert, 2021). In generale, il gas naturale può influire direttamente e positivamente sulla transizione energetica, aiutando le energie rinnovabili fornendo energia ininterrotta e riducendo le emissioni sostituendo ove possibile le altre fonti fossili (Ibidem). Tuttavia, non tutta la comunità scientifica vede nel gas naturale una soluzione nel raggiungimento degli obiettivi climatici di breve termine. Infatti, non solo gli investimenti nel gas naturale possono ostacolare gli investimenti nelle fonti rinnovabili, ma il problema delle fughe di metano può trasformare il gas naturale in una delle fonti energetiche con il peggior impatto sul riscaldamento globale (*Environmental Impacts of Natural Gas*, 2014) (Gürsan e de Gooyert, 2021).

2.3.1. Formazione, composizione e lavorazione

Il gas naturale, come le altre fonti fossili, si è formato con processi molto simili a partire da microrganismi depositati sul fondale marino che sono stati sottoposti ad un processo di trasformazione in condizioni chimico-fisiche specifiche (vedere paragrafo 2.2.1) (Turgeon e Morse, 2022). I depositi di gas naturale si trovano spesso vicino a quelli di petrolio (ENI, 2011) (Turgeon e Morse, 2022). I depositi più profondi, formati a temperature più elevate e sottoposti ad una pressione maggiore, contengono più gas naturale che petrolio. I depositi più profondi possono essere costituiti da gas naturale puro (Turgeon e Morse, 2022). Infatti, al di sotto dei 5.000 metri circa, il petrolio non è più stabile e il principale prodotto idrocarburico è il gas naturale termogenico (circa l'80% del gas naturale è gas termogenico mentre la restante parte è gas biogenico⁵⁸) (Encyclopaedia Britannica, n.d). Il gas termogenico è il prodotto del *cracking*⁵⁹ degli idrocarburi liquidi esistenti. Gli idrocarburi con una struttura chimica più grande di quella del metano (CH₄) vengono distrutti molto più rapidamente di quanto si formino. Pertanto, nei bacini sedimentari del mondo, si trova relativamente poco petrolio al di sotto dei 5.000 metri di profondità. Nei bacini più profondi si forma quello che in gergo tecnico viene definito *deep gas*, o gas profondo (Ibidem).

Riguardo alla composizione chimica, il gas naturale è costituito da una miscela di idrocarburi, per lo più metano (CH₄), e da altre sostanze di natura gassosa come il biossido di carbonio (CO₂), l'azoto, l'idrogeno solforato (H₂S) e, in alcuni casi, elio, radon e cripton. Le miscele che contengono quasi esclusivamente metano si dicono "secche", mentre le miscele in cui sono presenti anche altri idrocarburi come il propano (C₃H₈) e il butano (C₄H₁₀) si dicono "umide" (ENI, 2011). Il metano è l'idrocarburo gassoso più semplice e con la molecola più piccola (una molecola di carbonio e quattro di idrogeno). Inoltre è più leggero dell'aria, con un peso specifico di circa 0,678 kg al metro cubo, non ha colore né odore ed è atossico (ibidem).

Come il petrolio, il gas naturale migra e si accumula in trappole (Encyclopaedia Britannica, n.d) e spesso si estrae dagli stessi giacimenti di petrolio (ENI, 2011). Non vi è infatti ricerca di gas naturale distinta da quella del petrolio, ma un'unica attività di ricerca degli idrocarburi: solo dopo la perforazione dei pozzi esplorativi è possibile decretare la natura

⁵⁸ Il gas naturale biogenico viene formato dalla decomposizione anaerobica attuata da piccoli microrganismi chiamati metanogeni. Questi vivono nell'intestino degli animali (compresi gli esseri umani) e nelle aree con un quantitativo di ossigeno molto ridotto vicino alla superficie della Terra. Questo processo avviene spesso nelle discariche, nelle fognature e nelle zone paludose. Il processo di creazione del gas naturale (metano) da parte dei metanogeni è chiamato metanogenesi (Turgeon e Morse, 2022).

⁵⁹ Il cracking è il processo attraverso il quale le molecole di idrocarburi pesanti vengono scisse in molecole più leggere per mezzo del calore e della pressione a cui vengono sottoposte (Encyclopaedia Britannica, n.d).

del deposito. Quando il gas naturale si trova all'interno di un giacimento contenente anche petrolio, si parla di gas "associato", altrimenti si parla di gas "non associato". L'estrazione risulta un'attività relativamente facile: una volta perforato lo strato di roccia impermeabile che sigilla il giacimento, a causa della grande pressione il gas fuoriesce ed è sufficiente convogliarlo mediante tubature verso le sue destinazioni finali o nei centri di stoccaggio. Questi ultimi non sono serbatoi (come nel caso del petrolio), bensì giacimenti esauriti che vengono riutilizzati per immagazzinare il gas (Ibidem).

La lavorazione del gas naturale prevede trattamenti volti a separare tutti i vari idrocarburi e le impurità presenti nel gas naturale grezzo per ottenere quello che viene definito gas naturale secco di "qualità da gasdotto" (Stewart, 2014). Se il gas estratto è "umido", lo si sottopone a un trattamento preliminare per separare il metano dagli altri idrocarburi gassosi quali butano, propano ed etano, i quali verranno venduti separatamente (ENI, 2011). Per quel che concerne le impurità, per mezzo di opportuni trattamenti vengono eliminati biossido di carbonio e l'azoto (che rendono il gas naturale poco infiammabile), e l'idrogeno solforato, un gas tossico e corrosivo (Stewart, 2014) (ENI, 2011). Quest'ultima in particolare risulta essere l'impurità più dannosa. Infatti, in presenza di umidità, l'idrogeno solforato provoca il fenomeno delle piogge acide, causando malattie polmonari, danni alle piante e deterioramento di qualsiasi cosa esposta all'aria aperta (ENI, 2011). A volte il gas naturale può contenere sostanze preziose oltre agli idrocarburi precedentemente citati, come l'elio, il radon e il cripton. Alla fine, ciò che resta è prevalentemente metano. Infine, prima di essere distribuito, il gas metano per questioni di sicurezza viene "odorizzato" con l'aggiunta di mercaptani, che conferiscono il tipico odore che associamo al gas (Ibidem).

2.3.2. Versatilità a minori emissioni

Seppur una fonte energetica fossile, il gas naturale ha acquisito popolarità in quanto laddove può sostituire combustibili più inquinanti, migliora la qualità dell'aria e limita le emissioni di CO₂ (IEA, 2019). Infatti, il gas naturale è l'idrocarburo che brucia in maniera più pulita, generando circa la metà delle emissioni di CO₂ e solo un decimo degli inquinanti atmosferici del carbone quando viene bruciato per generare elettricità (Shell, n.d) (SNAM, 2022). Inoltre è una fonte energetica abbondante e versatile. Una centrale a gas impiega molto meno tempo per avviarsi e fermarsi rispetto a una centrale a carbone. Questa flessibilità rende il gas naturale un partner ideale delle fonti rinnovabili che soffrono di intermittenza quali l'energia solare ed eolica (Shell, n.d).

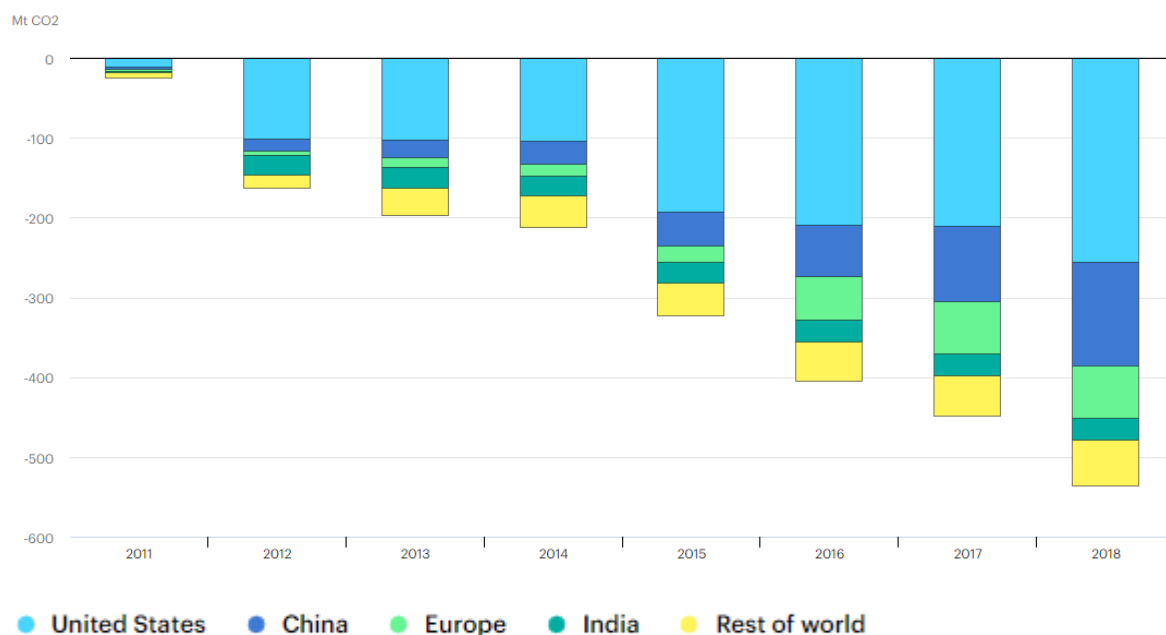
Quando si deve effettuare un confronto tra diverse fonti energetiche, il potere calorifico è una delle proprietà più importanti da valutare in quanto indica il contenuto energetico del combustibile (Lois et al., 2003). La Tabella 2.2 (pag. 45) evidenzia la superiorità del gas naturale, in termini di energia sprigionata durante la combustione, se paragonata con gli altri principali idrocarburi. Questo rende il gas naturale una fonte energetica più pregiata.

Oltre all'elevato potere calorifico, la combustione di gas naturale genera nel complesso minori emissioni di gas serra e inquinanti, contribuendo a sostenere il suo status di combustibile relativamente pulito rispetto ad altri combustibili fossili (IEA, 2017) (MET Group, 2020). La Figura 2.7 (pag. 52) evidenzia chiaramente i vantaggi derivanti dall'utilizzo del gas naturale rispetto al petrolio e soprattutto rispetto al carbone (IEA, 2017) (Shell, n.d). Per quel che riguarda le emissioni di CO₂, il gas naturale comporta un taglio delle emissioni di circa il 40% rispetto al carbone per ogni unità di energia prodotta (IEA, 2017). Il vantaggio rispetto al petrolio è meno evidente, ma comunque sostanziale: le emissioni sono inferiori del 20% circa. È innegabile che il gas ha svolto un ruolo importante nel contenere le emissioni di CO₂ in molti Paesi, contribuendo ad appiattare le emissioni globali legate all'energia dal 2014 (Ibidem).

Il vantaggio del gas naturale rispetto a petrolio e carbone è rafforzato dalle emissioni più contenute dei principali inquinanti atmosferici: particolato, ossidi di zolfo (in particolare l'anidride solforosa SO₂) e gli ossidi di azoto (NO_x) (IEA, 2017) (Gürsan e de Gooyert, 2021). Questi tre inquinanti, come già precedentemente esposto, sono responsabili degli impatti più diffusi dell'inquinamento atmosferico, sia direttamente, sia una volta trasformati in altri inquinanti attraverso reazioni chimiche nell'atmosfera. Si può constatare dalla Figura 2.7 (pag. 52) come i quantitativi di particolato e di anidride solforosa generate dalla combustione siano trascurabili (IEA, 2017).

È chiaro che il passaggio da un consumo non smodato di combustibili fossili, di per sé, non fornisce una risposta a lungo termine al cambiamento climatico, ma possono comunque esserci benefici significativi in termini di riduzione delle emissioni di CO₂ e di qualità dell'aria, in paesi, settori e tempi specifici, grazie all'utilizzo di combustibili a minore intensità di emissioni (IEA, 2019). Ad esempio, la Figura 2.8 mostra come dal 2010 il passaggio dal carbone al gas naturale abbia permesso di risparmiare circa 500 milioni di tonnellate di CO₂. Questo effetto è stato equivalente alla messa in circolazione di 200 milioni di veicoli elettrici a zero emissioni nel medesimo periodo (Ibidem).

Figura 2.8 – Risparmi di CO2 derivanti dal passaggio dal carbone al gas naturale in regioni selezionate dal 2010 al 2018. Dati espressi in MtCO₂.



Fonte: IEA, 2019

Un ulteriore elemento a favore del gas naturale è la sua stoccabilità e capacità di essere trasportato attraverso i metanodotti oppure liquefatto tramite navi metaniere (IEA, 2022). Il sistema di immagazzinamento del gas naturale permette infatti di regolare l'offerta relativamente all'elevata variabilità stagionale della domanda, causata principalmente dal settore civile, in cui l'uso del gas è finalizzato soprattutto per il riscaldamento (Carrino, 2019). Nei mesi invernali vi è un consumo molto maggiore di gas naturale prodotto o importato durante i mesi estivi, ciononostante, la disponibilità di gas rimane costante. L'eccedenza di gas naturale prodotto o importato durante i mesi estivi viene iniettato in giacimenti esausti per essere erogati all'occorrenza nei mesi invernali, quando la domanda è maggiore dell'offerta totale (Ibidem). La flessibilità del gas naturale si riscontra anche nella capacità delle centrali elettriche a gas di attivarsi rapidamente, consentendo al gas naturale di rispondere alle fluttuazioni della domanda sia stagionali che a breve termine e di fornire un supporto al crescente utilizzo di fonti rinnovabili intermittenti quali eolico e solare (IEA, 2022). In particolare, sono le centrali a turbogas ad essere capaci di rispondere in maniera così reattiva alle fluttuazioni della domanda, con un tempo di accensione stimato di 5-10 minuti contro le 2-10 ore per le centrali elettriche alimentate a carbone (IEA ETSAP⁶⁰, 2010).

⁶⁰ International Energy Agency Energy Technology Systems Analysis Programme.

Oltre alle caratteristiche merceologiche apprezzabili, a rendere il gas naturale sempre più popolare è l'ampia gamma di impieghi: dalla generazione di elettricità a fonte di calore per uso domestico e attività industriali, da carburante per l'autotrazione a input per la produzione di materie plastiche e prodotti chimici (*Uses of Natural Gas*, 2014).

Per quel che concerne l'autotrazione, il gas naturale si sta rivelando un sostituto ai derivati petroliferi sempre più importante nell'ambito della propulsione veicolare (ENI, 2011). Le case automobilistiche negli ultimi anni hanno investito sempre maggiori risorse nella ricerca e sviluppo per la progettazione di veicoli alimentati a gas metano (Ibidem). Il successo del gas naturale quale carburante per l'autotrazione si deve alla combustione meno inquinante, al prezzo minore⁶¹ e alla resa maggiore del combustibile (confrontato con i principali derivati petroliferi per autotrazione: benzina, diesel e GPL) nonché all'indice di sicurezza provato (ENI, 2011) (Boni, 2019).

Oltre al trasporto gommato, anche quello ferroviario, ove non vi siano tratti elettrificati per motivi di opportunità economica, può essere convertito dal diesel al GNL⁶² (CLM⁶³, 2018). Nel 2013 la società ferroviaria statale russa e Transmasholding hanno prodotto il primo esemplare di locomotiva alimentata a GNL, denominata TEM19 Shunting Locomotive (Zasiadko, 2019). Infine, anche la trazione navale a GNL è una realtà in continua crescita, con la sostituzione dell'olio combustibile e del diesel marittimo (Nappi, 2020). Compagnie mercantili e crocieristiche guardano al GNL quale combustibile più adatto a ridurre le loro ingenti emissioni, stimate a 3 punti percentuali circa sul totale delle emissioni globali di gas ad effetto serra (Nappi, 2020) (Lettig, 2021). Si stima che delle 51.000 navi⁶⁴ presenti nel mondo, solo 150 di esse siano alimentate a GNL, tuttavia, si stima per il 2030 un aumento fino a 5.000 unità (Nappi, 2020).

Per concludere, la versatilità e la maggior "eco-compatibilità" del gas naturale possono essere considerate le motivazioni sottostanti la rapida crescita nell'ultimo decennio, rappresentando quasi un terzo della crescita della domanda energetica mondiale (IEA, 2022). Il gas naturale costituisce probabilmente la miglior fonte energetica per ridurre le emissioni di CO₂ nel breve termine: è abbondante, versatile, flessibile, conveniente, meno inquinante e con un potere calorifico elevato (MET Group, 2020) (Gürsan e de Gooyert, 2021). Queste caratteristiche fanno del gas naturale un alleato perfetto delle fonti rinnovabili

⁶¹ Considerando i prezzi del 2019 e il potere calorifico sviluppato per ogni unità di combustibile di pari peso.

⁶² Gas Naturale Liquefatto.

⁶³ Cluster Lombardo della Mobilità.

⁶⁴ Aventi stazza lorda superiore alle 50 tonnellate (Nappi, 2020).

sopperendo alla loro intermittenza. Tuttavia, il problema delle fughe di metano potrebbe ridimensionare il vantaggio sulle altre fonti fossili, causando danni ancora più gravi (Ibidem).

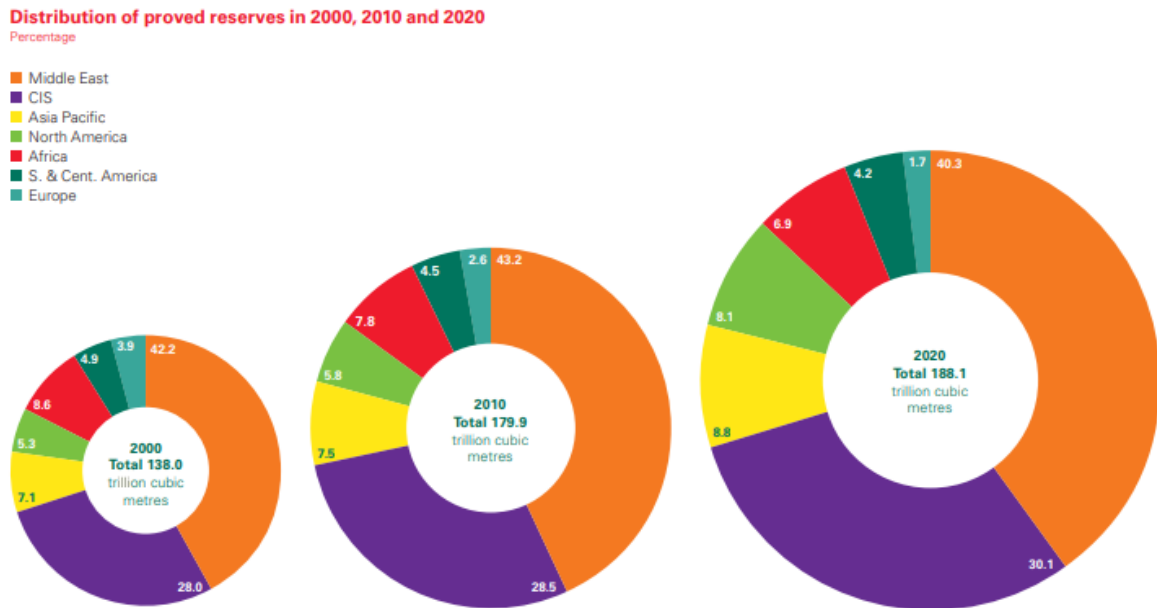
2.3.3. I limiti del gas naturale

Facendo una sintesi di quanto scritto nel paragrafo precedente, il gas naturale si distingue come combustibile di transizione per la sua economicità rispetto alle tecnologie rinnovabili, per la sua flessibilità, versatilità e soprattutto per i suoi effetti meno inquinanti rispetto a carbone e petrolio (Gürsan e de Gooyert, 2021). Tuttavia, sono diversi i limiti che minano la posizione di vantaggio ritagliata dal gas naturale rispetto le altre fonti fossili e come fonte di effettiva transizione. Infatti tra le critiche al suo utilizzo, si riscontra il timore che il gas naturale perpetri la dipendenza dalle fonti fossili e che il suo utilizzo ed incremento di popolarità possa essere d'ostacolo all'affermazione e all'investimento nelle fonti rinnovabili (Ibidem).

Il primo limite del gas naturale è il medesimo che accomuna tutte le fonti fossili: è una fonte d'energia non rinnovabile (Lieberman, 2016). Anche il gas naturale è sottoposto alla teoria del picco di Hubbert, con l'aspettativa che si raggiunga un punto oltre il quale la produzione sarà destinata a calare e i prezzi della materia prima aumenteranno (Maggio e Cacciola, 2012). Nel 2020, le riserve provate mondiali ammontavano a 188,1 miliardi di metri cubi (BP, 2021). Così come per il petrolio, anche il gas naturale è presente in poche aree geografiche a livello globale, come evidenziato dalla Figura 2.9, generando possibili conflitti di natura geopolitica e crisi energetiche come quella causato dal conflitto russo-ucraino. Medio Oriente e Paesi CIS⁶⁵ detengono complessivamente il 70% delle riserve provate, con Russia (19,7%), Iran (17%) e Qatar (13,3%) nelle prime tre posizioni. Il rapporto R/P globale stima che nel 2020 le riserve globali sono sufficienti per altri 49 anni circa (Ibidem). La Figura 2.10 mostra visivamente il rapporto R/P dei diversi Paesi/aree geografiche al rispettivo ritmo di produzione.

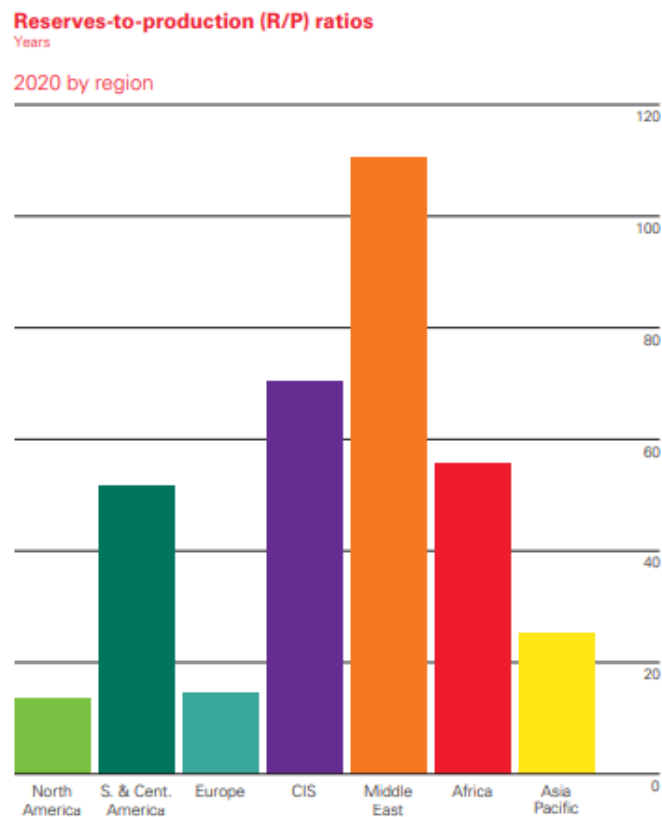
⁶⁵ Commonwealth of Independent States. Riferimento usato per indicare l'insieme di Stati una volta facenti parte dell'Unione Sovietica (Treccani, n.d).

Figura 2.9 – Distribuzione delle riserve provate di gas naturale nel mondo. Periodo 2000-2020.



Fonte: BP, 2021

Figura 2.10 – Rapporto R/P all'attuale ritmo di produzione dei Paesi/aree geografiche di produzione. Dato espresso in anni di produzione rimanenti.



Fonte: BP, 2021

Un altro problema relativo alla produzione del gas naturale è l'utilizzo della tecnica del *fracking*, che consiste nell'iniettare ad alta pressione una miscela di acqua, sabbia e sostanze chimiche ad alta pressione in un pozzo, fratturando la roccia molto al di sotto della superficie e liberando il gas naturale intrappolato all'interno. Il gas risale verso la superficie e fuoriesce dalla testa del pozzo (Lieberman, 2016). Sebbene l'utilizzo di gas naturale in sostituzione al carbone stia creando ampi benefici per la salute pubblica, per una migliore qualità dell'aria, e per l'ambiente, grazie alle minori emissioni durante la combustione, l'estrazione mediante *fracking* potrebbe portare a dei benefici nel breve ma non nel lungo termine (Wihbey, 2015). Infatti, il *fracking* pone notevoli problemi ambientali. Questa tecnica richiede enormi quantità d'acqua alle quali, come già esposto, vengono addizionate sostanze chimiche tossiche che vengono iniettate nel sottosuolo e che rischiano di contaminare le falde acquifere costituendo un grave rischio per l'ambiente e la salute umana. Infine, al rischio di contaminazione si aggiunge il rischio di innesco di terremoti a livello regionale (Lieberman, 2016).

Ulteriori danni sono da imputare alle pratiche di *flaring* e *venting* (Gruppo Hera, n.d). La prima pratica consiste nella combustione di accumuli di gas indesiderati perché troppo onerosi da recuperare durante l'estrazione di petrolio. Il *flaring* avviene anche nelle raffinerie, negli impianti di gas e durante la fase di prospezione dei pozzi (Gürsan e de Gooyert, 2021). La seconda pratica si somma al *flaring* ed è ancora più dannosa. Infatti, non tutto il gas naturale di scarto è soggetto a combustione. Alcune parti vengono disperse nell'atmosfera, contribuendo in maniera ancora più dannosa all'effetto serra a causa dell'elevato GWP₁₀₀ del metano (Gruppo Hera, n.d).

Non sempre tutte le fuoriuscite di metano sono volute e consapevoli come nelle pratiche di *venting*: un'altra fonte di dispersione di metano nell'atmosfera è costituita dalle fughe di metano accidentali (Gürsan e de Gooyert, 2021). Sebbene si sostenga che il gas naturale emetta meno inquinamento clima-alterante rispetto alle altre fonti fossili, c'è da entrare più in profondità nella questione. Il gas non produce gas serra pari a quelli prodotti da carbone e petrolio quando viene bruciato (Palmer, 2021). Tuttavia, prima di essere bruciato, il gas perde in ogni parte della filiera: dal pozzo, durante il trasporto lungo i gasdotti e nelle navi metaniere, nelle centrali elettriche e nelle case e nelle aziende dove viene utilizzato. Ciò significa che ad ogni passaggio, quantità non trascurabili di metano, un gas con un potenziale di riscaldamento globale 28 volte superiore a quello di CO₂, viene rilasciata nell'aria. Per comprendere appieno l'impatto del gas sul clima è necessario avere maggior consapevolezza delle perdite lungo la filiera e dove queste si verificano e possono essere

contenute (Ibidem). Il fatto che il gas naturale abbia emissioni di gas serra nel ciclo di vita inferiori a quelle del carbone e del petrolio dipende dal tasso di perdita ipotizzato, dall'efficienza di conversione energetica e da altri fattori (Environmental Impacts of Natural Gas, 2014). Secondo uno studio le perdite di metano devono essere mantenute al di sotto del 3,2% circa affinché le centrali elettriche a gas naturale abbiano emissioni del ciclo di vita inferiori a quelle delle nuove centrali a carbone. E se si vuole ottenere benefici marginali rispetto ai derivati del petrolio, le perdite devono essere mantenute al di sotto dell'1,6% circa. Un contenimento delle fughe di metano richiede nuove politiche e investimenti (Ibidem).

L'ultima criticità riguarda la difficoltà di trasporto e stoccaggio del gas naturale. Il gas naturale ha una bassa densità e dunque occupa un volume elevato previa compressione o liquefazione (MET Group, 2020). Inoltre, a differenza di altri combustibili fossili, non può essere immagazzinato in loco e deve essere consegnato quando viene consumato (DOE, 2015). Il gas naturale può essere trasportato in forma gassosa tramite gasdotti oppure in forma liquida⁶⁶, solitamente con navi metaniere. In sintesi, queste caratteristiche del gas rendono le relative infrastrutture (metanodotti, rigassificatori e giacimenti di stoccaggio) una componente chiave dell'affidabilità del sistema energetico nelle regioni d'utilizzo. La mancanza di adeguate infrastrutture pregiudica la disponibilità, e dunque il consumo, di tale fonte energetica (MET Group, 2020).

Per concludere, il gas naturale ha le potenzialità per essere una fonte energetica di transizione a supporto delle fonti rinnovabili (Gürsan e de Gooyert, 2021), tuttavia, è una fonte energetica molto più "sporca" di quanto si pensi e il cui uso necessita di una previa dotazione di infrastrutture adeguate (MET Group, 2020).

2.4. Il carbone

Con una crescita annua dell'1,6% nel decennio 2009-2019, dalla Rivoluzione industriale ad oggi, il carbone continua a ricoprire una posizione di primordine nel mix energetico globale, rappresentando nel 2019 il 27% dei consumi mondiali di energia primaria (Tabella 2.1 pag.

⁶⁶ Quando non è possibile il trasporto via metanodotto (per questioni di distanza o di mancanza di infrastruttura necessaria), il metano viene liquefatto e trasportato con navi metaniere. Il metano si liquefa a -161 gradi centigradi e ha un volume 600 volte minore al gas naturale nello stato gassoso originario. I costi del gas naturale trasportato per mezzo di metaniere ha un costo più elevato a causa della necessità di effettuare diversi trasbordi. Il primo consiste nel trasporto dal giacimento alla costa con metanodotto. Successivamente, il gas viene liquefatto e caricato sulle metaniere, munite di serbatoi isolati termicamente e di sofisticati sistemi di sicurezza e protezione ambientale. Una volta giunto a destinazione, il gas naturale liquefatto (GNL) viene scaricato nel terminale di importazione, dove viene riscaldato, riportato allo stato gassoso e immesso alla giusta pressione nella rete di metanodotti. Quest'ultimo insieme di passaggi avviene in impianti specifici nominati rigassificatori (ENI, 2011).

42) (BP, 2020) (BP, 2021). Questa roccia scura, fuliginosa e pesante ha fornito una base cruciale per far decollare la Rivoluzione industriale e successivamente le economie europee (Turner, 2021): era una fonte energetica più economica delle biomasse quali il legno, e produceva più energia durante la combustione. Permise di ottenere il vapore e la potenza necessarie per la produzione di industriale, generare elettricità, alimentare navi e treni per il trasporto delle merci (Turgeon e Morse, 2022). Oggi, rappresenta la prima fonte energetica per la generazione di elettricità a livello mondiale e un fattore di produzione di estrema importanza nell'industria siderurgica e cementifera (IEA, 2021). Tuttavia, abbondanza, disponibilità, sicurezza e convenienza (NCC⁶⁷, 2015) necessitano di pagare un caro prezzo a livello ambientale, in termini di elevate emissioni di gas serra e sottoprodotti della combustione tossico nocivi, e sociale, in termini di salute pubblica (Turner, 2021) (Turgeon e Morse, 2022). Con lo status di fonte fossile più inquinante, L'IPCC ha stabilito dei percorsi di trasformazione e scadenze, differenziati per Paesi OCSE e non OCSE, per l'eliminazione graduale del carbone dai mix energetici nazionali (Yanguas Parra et al., 2019). La necessità di eliminare quanto prima il carbone dal consumo energetico mondiale è resa tale dall'obiettivo di rimanere entro un aumento delle temperature medie mondiali di 1,5°C, come sottolineato nell'Accordo di Parigi (Ibidem).

2.4.1. *Formazione, composizione e lavorazione*

Le condizioni che portarono alla formazione del carbone iniziarono a svilupparsi circa 300 milioni di anni fa, durante il periodo Carbonifero (Turgeon e Morse, 2022). Durante questo periodo, la Terra era coperta da mari ampi e poco profondi e da fitte foreste. Occasionalmente i mari inondavano le aree boschive, sommergendo la materia vegetale morta in ambienti paludosi. Nel corso del tempo, la materia vegetale è stata compressa sotto il peso del fango e della vegetazione sovrastanti (*How Coal Works*, 2017) (Turgeon e Morse, 2022). I detriti vegetali, spostandosi in profondità, hanno incontrato temperature più elevate ed una maggiore pressione. Il fango e l'acqua hanno impedito alla materia di entrare in contatto con l'ossigeno, permettendo il processo di carbogenesi⁶⁸: la torba umida a basso contenuto di carbonio si trasforma in carbone, una roccia sedimentaria nera o nero-brunastra densa di energia e carbonio (Ibidem).

⁶⁷ National Coal Council.

⁶⁸ Processo chimico nel quale la materia vegetale, in assenza di ossigeno e a condizioni di temperature e pressione specifiche, subisce una trasformazione con perdita di idrogeno e ossigeno, soprattutto per azione batterica, generando una sostanza che depositandosi sul fondo di un bacino di sedimentazione darà origine al carbone fossile (Treccani, n.d).

La composizione del carbone varia a seconda delle differenti tipologie di carbone che si prendono sotto esame. La differenza sostanziale risiede nel contenuto di carbonio di tali categorie, che sono: lignite (25-35%), litantrace sub-bituminoso (36-45%), litantrace bituminoso (46%-86%) e antracite ($\geq 87\%$) (Tumuluru et al., 2012) (Turgeon e Morse, 2022). Il tempo e le condizioni fisico-geologiche a cui è stata sottoposta la torba ha determinato lo sviluppo di queste diverse qualità di carbone che sono più pregiate e meno inquinanti all'aumentare del contenuto di carbonio. Lignite e litantrace sub-bituminoso sono principalmente impiegati come combustibile per le centrali elettriche. Il litantrace bituminoso è impiegato sia in ambito energetico sia nel settore siderurgico sotto forma di *smithing coal* (carbone da fabbro) nelle fucine e di *coking coal* nelle industrie dell'acciaio. Infine, l'antracite, il più pregiato, per l'elevato contenuto di carbonio ed energetico e per l'assenza di acqua e fuliggine, viene utilizzato per stufe, forni e sistemi di filtraggio e quasi mai per la generazione di energia elettrica, anche a causa della sua minor disponibilità e costo più elevato (Turgeon e Morse, 2022).

Oltre al carbonio, nel carbone si trovano, in percentuali variabili, anche i seguenti elementi: idrogeno, ossigeno, azoto, zolfo, acqua (umidità), ceneri, cloro e altri elementi in tracce (Tumuluru et al., 2012). La componente più pericolosa del carbone è lo zolfo, che quando viene bruciato, rilascia inquinamento atmosferico tossico sotto forma di acido solfidrico (H_2S) (*How Coal Works*, 2017). La percentuale di zolfo è determinata dalle condizioni di formazione del carbone: i depositi di carbone a basso tenore di zolfo si sono sviluppati in ambienti di acqua dolce, mentre quelli ad elevato tenore si sono sviluppati presso paludi salmastre o ambienti marini (Ibidem).

L'estrazione del carbone può essere effettuata con diverse tecniche riassumibili in due macro categorie: *surface mining*, o estrazione di superficie, e *underground mining*, o estrazione sotterranea (Turgeon e Morse, 2022). Per quel che concerne la lavorazione, prima di essere spedito su lunghe distanze, il carbone viene sottoposto ad un processo di preparazione per ridurre i costi di trasporto e prepararlo all'uso nelle centrali elettriche (*How Coal Works*, 2017). La preparazione comprende generalmente la frantumazione del carbone e la rimozione di materiali estranei pesanti e non carboniosi. Se il carbone è ricco di zolfo o di altre impurità, viene lavato con un bagno d'acqua o chimico che rimuove fino al 40% dello zolfo inorganico presente (Ibidem).

2.4.2. *Abbondanza e convenienza*

Il carbone è la risorsa energetica più abbondante al mondo (NCC, 2015). Al 2020, le riserve provate a livello mondiale ammontano a 1.074 Gt di carbone, sufficienti per circa 139 anni agli attuali ritmi di produzione, contro i circa 50 anni del petrolio e 49 anni del gas naturale ai rispettivi ritmi di produzione (BP, 2021). Oltre all'abbondanza, il carbone è anche maggiormente disponibile con una dispersione maggiore nel mondo se paragonata a quella di petrolio e gas naturale. Quasi tutte le regioni del mondo detengono riserve carbonifere, ad eccezione della area medio-orientale in cui sono molto scarse (Miller, 2005). Questo offre ai Paesi la possibilità di essere autosufficienti dal punto di vista energetico o, per lo meno, di fare affidamento sull'energia nazionale piuttosto che su quella importata (Ibidem). Infatti, nei circa 70 Paesi in cui si estrae carbone, l'85% della produzione viene consumato internamente, con appena il 15% della materia estratta scambiata sul mercato internazionale (NCC, 2015).

Il consumo mondiale di carbone continua a crescere, soprattutto nei Paesi in via di sviluppo grazie alla sua convenienza (Ibidem). Infatti, se nel mondo occidentale la produzione di carbone sta subendo un costante e deciso calo, nelle economie emergenti e nei Paesi in via di sviluppo le strategie energetiche riconoscono il valore nell'utilizzo delle riserve nazionali sfruttabili (Baruya, 2019). In questi Paesi, le risorse interne di carbone possono difatti costituire un sostegno importante per la sicurezza dell'approvvigionamento, contribuendo in tal modo a garantire la sicurezza energetica nazionale e ridurre la dipendenza dalle importazioni energetiche. Infatti, nelle economie più deboli, lo sviluppo economico è spesso volte ostacolata dai costanti deficit energetici dovuti alla mancanza di investimenti in forniture elettriche affidabili. In questi contesti, il carbone fornisce energia elettrica a basso costo e rischio (Ibidem): le interruzioni di corrente sono dannose per la salute, il benessere e la prosperità economica dei cittadini del mondo (NCC, 2015).

Sicurezza e stabilità dell'approvvigionamento sono rese possibili anche grazie alla possibilità di poter trasportare facilmente il carbone via nave, chiatte, ferrovia e camion, senza la necessità di predisporre infrastrutture di condotte (Ibidem). Il carbone ha anche il vantaggio di poter essere stoccato in loco, fornendo settimane o addirittura mesi di combustibile alla centrale elettrica. Quest'ultima caratteristica contribuisce all'affidabilità e alla resilienza della rete e riduce le strozzature nell'approvvigionamento di combustibile (Ibidem). La sfida più grande per questi Paesi è capire cosa sostituirà il carbone. I costi delle rinnovabili sono scesi enormemente, ma il carattere intermittente di queste risorse

rappresenta una sfida, soprattutto per le reti elettriche piccole e in rapida crescita (Schwartz, 2019).

Infine, una delle maggiori qualità del carbone è la sua versatilità d'impiego (NCC, 2015). Dall'industria cementizia a quella siderurgica, dalla produzione di fibre e schiume di carbonio a quella di medicinali e fertilizzanti (USGS⁶⁹, n.d), l'impiego del carbone non si limita alla sola produzione di energia elettrica (Baruya, 2019). L'utilizzo dei sottoprodotti delle centrali elettriche a carbone fornisce una materia prima economica per la produzione di cemento e calcestruzzo. Ad esempio, le ceneri leggere residuanti dalla combustione del carbone nelle centrali termoelettriche sono utilizzate come materiale legante nel cemento. Il riciclo dei sottoprodotti industriali consente innanzitutto di ridurre i volumi da conferire in discarica, limitando l'utilizzo di *clinker*, principale componente del cemento, consentendo inoltre a risparmiare in maniera considerevole sulla quantità di combustibile da adoperare per la sua cottura, con vantaggi economici e ambientali (Ibidem). Infatti, la produzione di *clinker* è un processo energivoro che richiederebbe l'utilizzo di circa 200-450 kg di carbone per ogni tonnellata di cemento prodotto (WCA⁷⁰, n.d). Delle 100 Mt di rifiuti di carbone prodotti nel 2017 negli Stati Uniti, la percentuale di riciclo è stato superiore al 70%, con principale impiego nell'industria cementizia e nell'agricoltura (Baruya, 2019).

Un'altra industria dove il carbone ha un ruolo essenziale è l'industria siderurgica. Il carbone metallurgico, o *coking coal*, è un ingrediente essenziale per la produzione di acciaio. Occorrono circa 770 kg di carbone per produrre una tonnellata di acciaio e circa il 70% dell'acciaio globale viene prodotto in altiforni ad ossigeno⁷¹ (che richiedono l'utilizzo del carbone metallurgico) (BHP⁷², n.d).

Anche nella produzione dell'idrogeno il carbone apporta un contributo importante. La gassificazione del carbone offre un metodo versatile per convertire il carbone in idrogeno e altri prodotti di valore (WCA, n.d). La gassificazione scompone il carbone nei suoi componenti chimici di base. Il processo porta le molecole del carbone a rompersi, dando inizio a reazioni chimiche che producono gas di sintesi (*syngas*), idrogeno, monossido di carbonio e altri composti gassosi. Il 20% della produzione di idrogeno proviene da processi *Coal-to-Gas* (Ibidem).

⁶⁹ U.S Geological Survey. Agenzia scientifica del Dipartimento degli Interni.

⁷⁰ World Coal Association.

⁷¹ Gli altiforni elettrici, che rappresentano il restante 30% della produzione, sono impiegati per produrre acciaio attraverso il riciclo dei rifiuti d'acciaio e non necessitano dell'aggiunta di carbone (WCA, n.d)

⁷² Broken Hill Proprietary Company Limited.

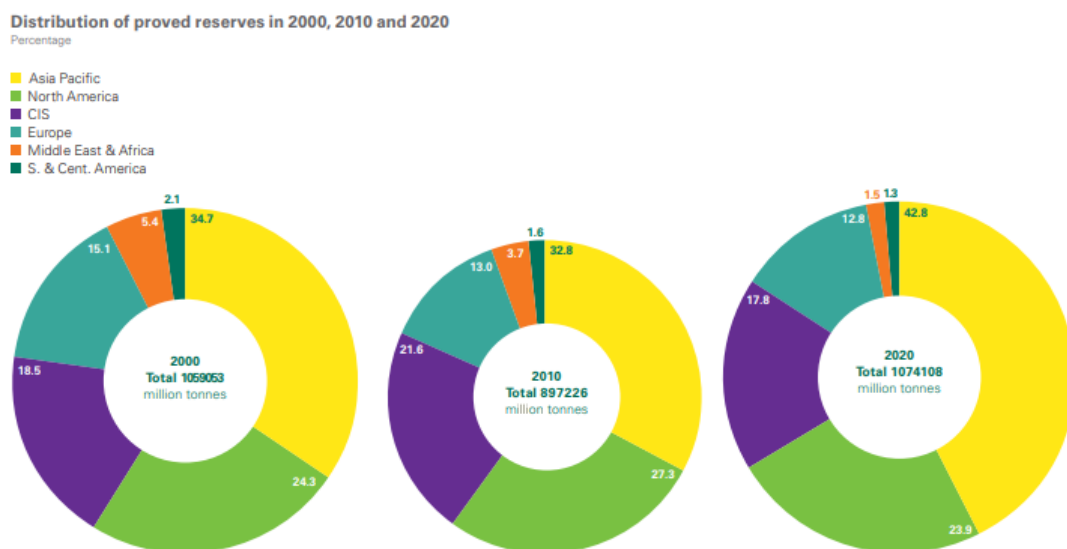
La versatilità del carbone trova ancora conferma anche per la sua capacità di contribuire al settore dei trasporti (NCC, 2015). Può essere utilizzato per produrre carburanti liquidi per il trasporto, fornendo una valida alternativa ai prodotti petroliferi convenzionali. Inoltre, il *coal-to-liquid* offre il vantaggio della completa compatibilità con le infrastrutture e il parco veicoli esistenti, il che implica un costo di transizione prossimo allo zero (Chen et al., 2019). Tuttavia, dal punto di vista della produzione di carburante, la tecnologia di produzione *Coal-to-Liquid* deve ancora affrontare le incertezze dell'efficienza energetica, dell'impatto ambientale e della fattibilità economica (Ibidem).

Alla luce dei numerosi utilizzi e applicazioni del carbone, il processo di decarbonizzazione porterà indubbiamente benefici all'ambiente, ma la complessa fase di transizione dell'economia industriale, in ogni caso, dovrà essere affrontata in maniera globale, prevedendo il pieno sostegno dell'intera filiera strettamente connessa al sistema dell'industria carbonifera (Baruya, 2019).

2.4.3. Emissioni elevate e inquinanti tossici

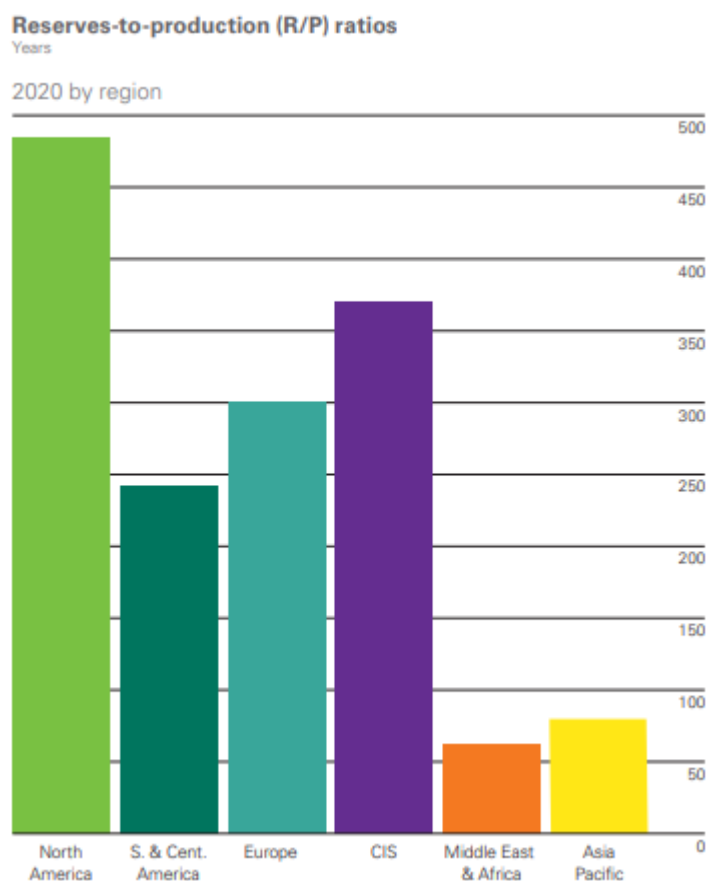
Come il petrolio e il gas naturale, anche il carbone è una fonte energetica non rinnovabile. Ha richiesto milioni di anni per formarsi e sul nostro pianeta ne esiste una quantità limitata. Sebbene al momento sia una fonte di energia consistente e affidabile, non sarà disponibile per sempre (Turgeon e Morse, 2022). Con riserve mondiali provate nel 2020 pari a 1.074 Gt, al ritmo di consumo attuale tali riserve saranno sufficienti per 139 anni circa (BP, 2021). Le Figure 2.11 e 2.12 mostrano rispettivamente la localizzazione geografica delle riserve carbonifere provate e il rapporto R/P per singola area geografica.

Figura 2.11 – Distribuzione delle riserve provate di carbone nel mondo. Periodo 2000-2020.



Fonte: BP, 2021

Figura 2.12 – Rapporto R/P all’attuale ritmo di produzione dei Paesi/aree geografiche di produzione. Dato espresso in anni di produzione rimanenti.

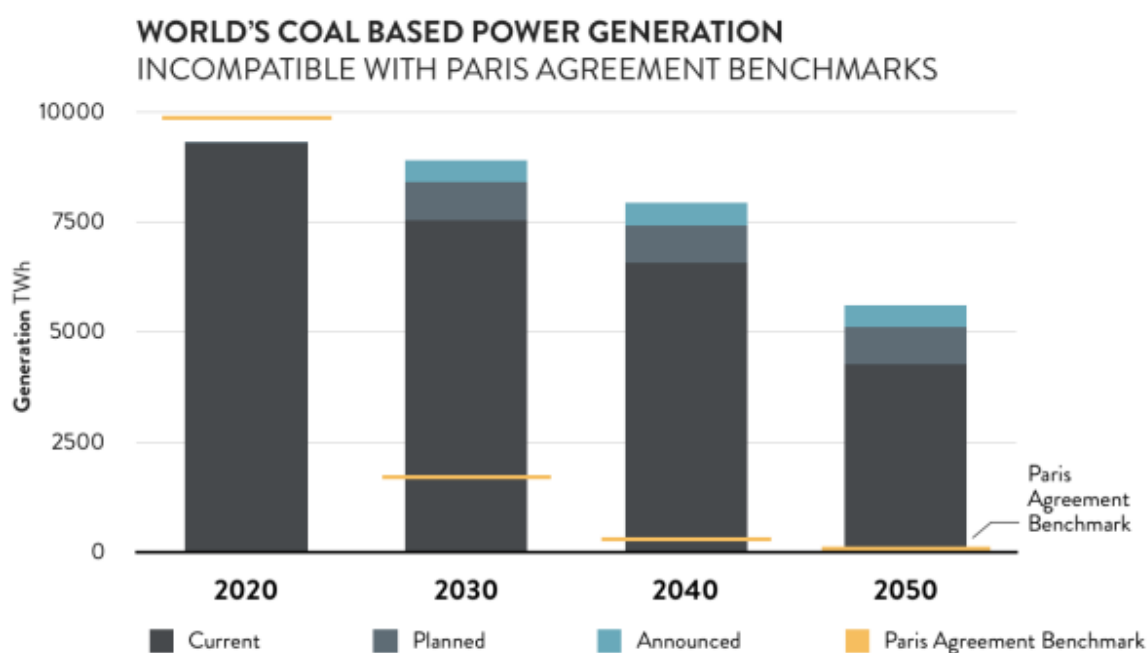


Fonte: BP, 2021

Al di là del carattere non rinnovabile, la maggior criticità del carbone è l’insieme di emissioni clima-alternati, particolati e sostanze tossiche rilasciati nell’ambiente quando viene bruciato, con un forte impatto ai danni dell’ambiente e della salute pubblica (Turgeon e Morse, 2022). Il cambiamento climatico è il più grave impatto globale a lungo termine del carbone (*Coal Power Impacts*, 2017). Dal punto di vista chimico, il carbone è costituito prevalentemente da carbonio che, quando viene bruciato, reagisce con l’ossigeno dell’aria producendo biossido di carbonio. La Figura 2.7 (pag. 52) mostra come oltre il 40% delle emissioni globali di CO₂ del settore energetico siano determinate dalla combustione di carbone, pur questo rappresentando nemmeno il 30% dei consumi mondiali di energia primaria (IEA, 2017) (BP, 2017). Tali livelli sono lungi dall’essere compatibili con gli obiettivi dell’Accordo di Parigi di contenere l’incremento delle temperature medie mondiali entro 1,5°C (Yanguas Parra et al., 2019). I percorsi compatibili con l’Accordo di Parigi e coerenti con un riscaldamento globale di 1,5°C sono stati definiti nel *IPCC 1.5°C Special*

Report, dove viene evidenziato il ritmo al quale i diversi paesi dovrebbero abbandonare l'uso del carbone. Attualmente il mondo non sta procedendo verso un'eliminazione del carbone compatibile con l'Accordo di Parigi (IPCC, 2018). Le centrali a carbone attuali e pianificate a livello globale porterebbero ad un aumento della produzione del 3% entro il 2030 rispetto ai livelli del 2010. Se il mondo non invertisse le tendenze attuali, le emissioni cumulative derivanti dalla produzione di energia elettrica da carbone sarebbero quasi quattro volte superiori a quelle compatibili con l'accordo di Parigi entro il 2050 (Figura 2.13) (Yanguas Parra et al., 2019).

Figura 2.13 – Scenari futuri di riduzione di produzione di energia elettrica da carbone secondo le politiche energetiche a livello mondiale attuali.



Fonte: Yanguas Parra et al., 2019

Per non vanificare la possibilità di rimanere entro il limite di 1,5°C previsto alla COP21, i Paesi dovranno pianificare il ritiro anticipato di un gran numero di centrali a carbone esistenti, ridurre il fattore di capacità di quelle rimaste e astenersi dal costruire nuova capacità produttiva basata sulla combustione di carbone (Ibidem).

La Figura 2.7 mette in evidenza un'altra criticità legata alla combustione del carbone: l'elevato livello di emissioni di ossidi di zolfo (SO_x), tra cui anche l'anidride solforosa (SO₂). L'uso del carbone domina le emissioni globali di anidride solforosa che, come già trattato, è causa di malattie respiratorie e precursore delle piogge acide (IEA, 2017). Gli ossidi di zolfo non sono l'unica emissione nociva risultante dall'utilizzo del carbone. Quando il carbone viene bruciato rilascia una serie di tossine e inquinanti nell'aria (*Coal*

Power Impacts, 2017). Questi sono: Ossidi di azoto, responsabili dell'ozono troposferico (*smog*) e di malattie respiratorie; PM 10 e 2,5 (fuliggine), che producono foschia e possono causare bronchite cronica, aggravamento dell'asma e morte prematura; mercurio, una neurotossina che può contaminare i corsi d'acqua, rendere il pesce non sicuro da mangiare e causare difetti alla nascita; a queste sostanze ed elementi si aggiungono emissioni di monossido di carbonio, composti organici volatili e metalli pesanti tossici quali arsenico, cadmio e piombo (*How Coal Works*, 2017) (Turgeon e Morse, 2022).

Non solo l'aria ma anche le acque e la terra sono esposte al rischio di contaminazione (Ibidem). Ad esempio, il carbone ad alto tenore di zolfo viene sottoposto a lavaggio per soddisfare le normative ambientali. Purtroppo, i contaminanti rimossi durante il lavaggio devono andare da qualche parte e di solito vengono lasciati in grandi bacini di raccolta delle acque reflue, note come "*slurry*". Tale prodotto della lavorazione può contaminare i corsi d'acqua e le riserve di acqua potabile (*Coal Power Impacts*, 2017) (*How Coal Works*, 2017), ma anche i terreni, a causa delle infiltrazioni metalli pesanti disciolti, causando complessivamente anche danni alla flora e alla fauna locali, nonché alle alla salute umana (WWF, n.d).

Per contrastare le emissioni soprammenzionate, sono state sviluppate tecnologie (CCT, *Clean Coal Technologies*) per rendere meno inquinante la combustione, e dunque l'utilizzo di carbone. Queste tecnologie si suddividono in tecnologie di filtraggio e controllo degli inquinanti e *CCS Systems (Carbon Capture and Storage)*, ossia tecnologie di cattura e stoccaggio del carbonio (WCA, n.d) (*How Coal Works*, 2017). I metodi più comuni di mettere in atto il primo gruppo di tecnologie consistono nell'utilizzo di *scrubber* e filtri. Gli *scrubber* utilizzano una fanghiglia di calcare bagnata per assorbire l'inquinamento al suo passaggio (*How Coal Works*, 2017). I filtri sono costituiti da grandi sacchi di tessuto che catturano il particolato mentre lo attraversa. Tuttavia, quest'ultima misura non consente comunque di trattenere il particolato più sottile, ovvero quello più dannoso per la salute. Nel complesso queste tecnologie permettono di ridurre i quantitativi di emissioni inquinanti come l'anidride solforosa, gli ossidi di azoto e le emissioni di metalli pesanti quali il mercurio (fino al 90% nei sistemi più avanzati) (Ibidem).

Le tecnologie CCS hanno invece il compito di impedire il rilascio di grandi quantità di CO₂ nell'atmosfera (WCA, n.d) Le emissioni vengono eliminate dal flusso di scarico e vengono stoccate in formazioni rocciose geologiche accuratamente selezionate, situate a diversi chilometri sotto la superficie terrestre, attraverso lo stoccaggio geologico. Quando la CO₂

viene pompata in profondità nel sottosuolo, viene compressa e diventa essenzialmente un liquido a causa dell'elevata pressione (Ibidem).

Sebbene da un lato le tecnologie di controllo degli inquinanti possono apportare dei benefici in termini di minor inquinamento prodotto (tuttavia mai pari a zero), le tecnologie CCS rappresentano per molti un costoso fallimento (Schlosberg e Hart, 2021). Infatti, tra il 2009 e il 2013, i costi in ricerca e sviluppo per tecnologie CCS superava il miliardo di dollari l'anno, dopo di che vi fu un crollo degli investimenti (*'Clean Coal' Technologies, Carbon Capture & Sequestration*, 2021). Inoltre, il funzionamento di un sistema di cattura e stoccaggio del carbonio è incredibilmente dispendioso dal punto di vista energetico: in sostanza, per far funzionare il sistema è necessario l'utilizzo di un elevato quantitativo di energia elettrica, creando un'altra fonte di inquinamento atmosferico e di CO₂. Ciò mina l'intero obiettivo della cattura del carbonio (Schlosberg e Hart, 2021). Per quantificare, l'energia necessaria per attivare la cattura e stoccaggio costerebbe alla centrale elettrica circa il 20% del proprio output, dunque incidendo considerevolmente sul rendimento finale dell'impianto (*'Clean Coal' Technologies, Carbon Capture & Sequestration*, 2021). Oltre alla perdita di efficienza, un recente studio effettuato da Sekera e Lichtenberger mostra che, a causa della grande quantità di energia richiesta per alimentare la cattura e stoccaggio del carbonio, i Paesi potrebbero produrre più CO₂ di quanta ne venga effettivamente rimossa. Infine, è necessario sottolineare che lo stoccaggio geologico non è esente da rischi, sia a causa delle possibili fughe di CO₂ che potrebbero contribuire a inquinare "silenziosamente" l'atmosfera, sia a causa dei possibili terremoti innescati dal pompaggio sotterraneo.

Per concludere, il carbone rappresenta una delle fonti energetiche più controverse al mondo: I vantaggi derivanti dall'estrazione del carbone sono significativi dal punto di vista economico e sociale. Tuttavia, l'estrazione devasta l'ambiente, dall'atmosfera ai terreni e alle acque (Turgeon e Morse, 2022), con tecnologie di "pulizia" costose e dalla dubbia efficacia. Benché si preveda una graduale eliminazione dell'uso del carbone dal mix energetico, in alcuni Paesi continuerà ad essere impiegato per diversi decenni e la progressiva eliminazione o la totale cessazione delle attività carbonifere costituirà un'importante sfida per i Paesi e le regioni minerarie (Baruya, 2019).

2.5. *Le fonti rinnovabili*

Con una quota della produzione globale di elettricità pari al 26,6% e del consumo mondiale di energia primaria pari all'11,4% nel 2019, le fonti energetiche rinnovabili sono al centro della transizione verso un sistema energetico meno inquinante e più sostenibile (BP, 2020)

(IEA, 2022). Queste sono cresciute rapidamente negli ultimi anni, grazie al sostegno politico e alla forte riduzione dei costi, in particolare per il solare fotovoltaico e l'eolico (IEA, 2022). Nel ventennio 2000-2020, le rinnovabili sono cresciute del 55% circa nel loro contributo alla produzione globale di energia elettrica (Ibidem). Queste, si stima, saranno responsabili di oltre un terzo delle riduzioni delle emissioni di CO₂ tra il 2020 e il 2030, secondo lo scenario "Emissioni nette zero entro il 2050". La diffusione delle energie rinnovabili nei settori dell'energia elettrica, del riscaldamento e dei trasporti è uno dei principali fattori che consentono di mantenere l'aumento della temperatura media globale al di sotto di 1,5°C (IEA, 2022). Tuttavia, l'uso delle fonti energetiche rinnovabili deve crescere molto più rapidamente per raggiungere lo scenario *Net Zero*. Queste fonti devono aumentare la loro quota complessiva entro il 2030 con un aumento annuo ad un tasso medio di circa il 13% nel periodo 2022-2030, il doppio rispetto al periodo 2019-2021 (Ibidem).

Le rinnovabili non hanno il solo beneficio di permettere di ridurre le proprie emissioni di carbonio: consentono di evitare le emissioni di inquinanti tossici e pericolosi per la salute grazie all'assenza di combustione (ad eccezione delle biomasse); consentono di stabilizzare il prezzo dell'energia elettrica, esponendosi meno alle fluttuazioni di prezzo delle fonti energetiche fossili; consentono di migliorare l'affidabilità e resilienza del sistema energetico locale e nazionale, grazie alla decentralizzazione della produzione energetica e minor ricorso alle importazioni energetiche (*Benefits of Renewable Energy Use*, 2008). Tuttavia, tali benefici devono fare i conti con alcuni aspetti negativi, tra cui uno dei più significativi è la dipendenza dall'estrazione di "terre rare", con un impatto ambientale e sociale non trascurabile (MacDonald, 2019).

Le fonti rinnovabili sono attualmente la spina dorsale di qualsiasi transizione energetica per raggiungere lo Zero Netto. Mentre il mondo si allontana sempre più dai combustibili fossili che emettono grandi quantitativi di CO₂, la comprensione del ruolo attuale delle rinnovabili nella decarbonizzazione di più settori è fondamentale per garantire un percorso agevole verso lo zero netto (IEA, 2021).

2.5.1. Introduzione e analisi delle principali tecnologie

L'energia rinnovabile è l'energia derivata da fonti naturali che si ripristinano ad una velocità superiore a quella con cui vengono consumate (ONU, n.d). Il termine "rinnovabile" esprime l'essenza di questo tipo di energia: la capacità di essere disponibile in natura e rigenerarsi continuamente, senza l'intervento dell'uomo, in maniera spontanea e in quantità tendenzialmente inesauribile (Enel, n.d). La luce del sole e il vento, ad esempio, sono fonti

che si ricaricano costantemente. Le fonti di energia rinnovabile sono abbondanti e tutte intorno a noi (ONU, n.d).

Sole, forza del vento o dell'acqua, calore della terra ed energia delle biomasse: produrre energia rinnovabile vuol dire utilizzare tali elementi, presenti in maniera abbondante e diffusa in natura, per generare energia elettrica, consentendo al contempo di ridurre drasticamente le emissioni clima-alteranti (Enel, n.d) (EDF Group⁷³, n.d). Le principali fonti di energia rinnovabile sono (tra parentesi la percentuale di contribuzione alla generazione di energia elettrica a livello mondiale nel 2019): l'energia solare (10,6%), da distinguere in solare fotovoltaico e solare a concentrazione; l'energia eolica (21,8%); l'energia idroelettrica (66,2%); l'energia mareomotrice⁷⁴ (0,00015%); l'energia geotermica⁷⁵ (1,4%) e l'energia da biomasse (EDF Group, n.d) (IEA, 2022).

La ragione per cui si è deciso di escludere l'energia da biomasse⁷⁶, la cui principale fonte è costituita dalle biomasse legnose (NREL⁷⁷, n.d), risiede nel fatto che si tratta di una fonte rinnovabile che spesso necessita dell'intervento dell'uomo e che richiede un processo di combustione per ottenere energia elettrica o termica, rilasciando di conseguenza emissioni di CO₂ (Edomah, 2018). Le biomasse sono da considerarsi fonti rinnovabili se quanto viene sottratto all'ambiente naturale o agricolo corrisponde a quanto nuovamente sarà riprodotto (LIPU⁷⁸, n.d). Per il bilancio di CO₂, il calcolo non deve tenere conto solo dei quantitativi di materia che viene sottoposta a combustione e dei quantitativi di materia che vengono

⁷³ Électricité de France Group.

⁷⁴ L'energia delle maree è una forma di energia prodotta dall'innalzamento e dall'abbassamento naturale delle maree causato dall'interazione gravitazionale tra la Terra, il Sole e la Luna. Le correnti di marea con energia sufficiente per la raccolta si verificano quando l'acqua passa attraverso una costrizione, provocando un movimento dell'acqua più veloce. I luoghi adatti per catturare l'energia delle maree sono quelli con grandi differenze nell'escursione di marea, ovvero la differenza tra l'alta e la bassa marea, e dove i canali di marea e i corsi d'acqua diventano più piccoli e le correnti di marea più forti (Pacific Northwest National Laboratory, n.d).

⁷⁵ La tecnologia geotermica estrae il calore presente nel sottosuolo, che può essere utilizzato direttamente per il riscaldamento e il raffreddamento o convertito in elettricità. Per generare elettricità, tuttavia, sono necessarie risorse a media o alta temperatura. Queste sono solitamente situate in prossimità di regioni tettonicamente attive, dove l'acqua calda e/o il vapore sono trasportati verso la superficie terrestre o possono essere raggiunti a basse profondità (IRENA, n.d).

⁷⁶ Il termine "biomassa" indica qualsiasi combustibile derivato dalle piante. Questo termine comprende i residui delle colture, il legno, le colture a fini energetici e i rifiuti animali. La biomassa può essere utilizzata per il riscaldamento (come le stufe a legna), per la produzione di elettricità in una centrale elettrica, sotto forma di combustibile solido o gassoso (biometano), oppure come combustibile liquido per l'autotrazione (Edomah, 2018). Le filiere agroenergetiche per la produzione di biomassa per finalità energetiche sono sostenibili se: 1) sono corte (nello spazio) e brevi (nel tempo); 2) riescono a garantire un bilancio energetico positivo e una produzione complessiva di CO₂ negativa o nulla; 3) non prescindono dal contributo che le buone pratiche agricole possono dare alla fissazione al suolo del carbonio, alla lotta alla desertificazione e all'erosione, al processo di graduale sostituzione dei concimi chimici e al miglioramento della qualità dei suoli (LIPU, n.d).

⁷⁷ National Renewable Energy Laboratory.

⁷⁸ Lega Italiana Protezione Uccelli.

riprodotti annualmente. Laddove il ripristino è artificiale, con coltivazioni e riforestazioni ad opera dell'uomo, le emissioni prodotte dalla combustione devono tenere in considerazione, oltre alla materia prima, tutte le attività intercorse ai fini della produzione, dunque tutto il ciclo di vita, che può includere: utilizzo di fertilizzanti di sintesi e fitofarmaci, utilizzo di macchine agricole, pompe per l'irrigazione e trasporto dei prodotti. Tutte queste attività richiedono l'utilizzo di grandi quantitativi di energia, spesso di origine fossile. Pertanto, è molto difficile che il bilancio sia in equilibrio poiché non vi è più una produzione netta di CO₂. Le biomasse dovrebbero perciò essere naturali o prodotte biologicamente o "secondo natura" (Ibidem). Inoltre necessitano di grandi quantitativi di terreno per la coltura ed entrano in competizione con la produzione agricola ad uso alimentare, rischiando di far aumentare i prezzi e sollevando questioni etiche. Queste considerazioni e limiti fanno sì che le biomasse potranno fornire solo una piccola parte del fabbisogno energetico futuro (Edomah, 2018).

Sebbene quello delle rinnovabili sia un argomento vasto con numerose soluzioni tecnologiche per la produzione di energia, per motivi di spazio, ai fini della trattazione, verranno trattate le principali tre tecnologie per contributo (idroelettrico, eolico e solare). Nel 2019, l'energia idroelettrica rappresentava la prima fonte energetica rinnovabile per contributo (66,2%), distaccando in maniera netta tutte le altre tecnologie menzionate (IEA, 2022). L'idroelettrico genera energia utilizzando una diga o una struttura di deviazione per alterare il flusso naturale di una fiume o di un altro corpo idrico (EERE, n.d). Questa fonte di energia si basa sulla continua rigenerazione del ciclo dell'acqua per produrre elettricità, utilizzando un combustibile (l'acqua) che non viene ridotto o consumato durante il processo (Ibidem). L'energia cinetica dell'acqua in movimento fa ruotare le turbine. Queste a loro volta azionano i generatori, che convertono l'energia meccanica delle turbine in elettricità. Successivamente, i trasformatori convertono la tensione alternata adatta ai generatori in una tensione più alta adatta alla trasmissione a lunga distanza (Encyclopaedia Britannica, n.d). Esistono tre diversi tipologie di impianti di energia idroelettrica, il più comune dei quali è l'impianto a bacino. In questa prima tipologia, una diga viene utilizzata per controllare il flusso dell'acqua immagazzinata in una piscina o in un serbatoio (National Geographic Society, n.d). Quando avviene un incremento della domanda di energia, l'acqua viene rilasciata dalla diga, che scorrendo verso il basso attraverso una turbina, fa girare le sue pale alimentando un generatore. Il secondo tipo di impianto di energia idroelettrica è un impianto di deviazione. Questo tipo di impianto è unico in quanto non utilizza una diga. Utilizza invece una serie di canali per incanalare l'acqua del fiume verso le turbine che alimentano

il generatore (Ibidem). Il terzo tipo di impianto è chiamato impianto di pompaggio. Quest'ultimo impianto raccoglie l'energia prodotta in eccesso da altre fonti energetiche, come eolico e solare, e la immagazzina per un uso futuro: l'impianto immagazzina l'energia pompando l'acqua in salita da una vasca a bassa quota ad un serbatoio situati ad un'altezza maggiore. Quando la domanda di elettricità subisce un picco, l'acqua presente nel bacino più alto viene rilasciata, generando elettricità tramite turbine in un impianto più a valle (Ibidem).

La seconda fonte energetica rinnovabile in termini di contributo (21,8%) è rappresentata dall'energia eolica (IEA, 2022). Questa energia è in realtà un sottoprodotto del sole: il riscaldamento irregolare dell'atmosfera da parte del sole, le superfici irregolari della terra e la rivoluzione del pianeta intorno al sole si combinano per creare il vento (EERE, n.d). Questa energia viene creata utilizzando una turbina eolica, ossia un dispositivo che incanala la potenza del vento per generare elettricità. Il vento fa muovere le pale di una turbina che, collegate ad un rotore, fa girare un generatore per creare elettricità (pressoché uguale all'idroelettrico) (National Geographic Society, n.d). Esistono due tipi di turbine eoliche: le turbine ad asse orizzontale (HAWT) e le turbine ad asse verticale (VAWT). Le HAWT rappresentano la tecnologia più comune di turbine eoliche. Di solito hanno due o tre pale lunghe e sottili con la turbina che ruota in cima alla torre in modo che le pale siano rivolte verso il vento. Le VAWT hanno pale curve, più corte e più larghe che assomigliano agli sbattitori utilizzati in cucina. Queste turbine sono omnidirezionali, il che significa che non hanno bisogno di essere regolate per essere orientate verso il vento per funzionare (National Geographic Society, n.d) (EERE, n.d).

Le moderne turbine eoliche possono essere classificate in base al luogo di installazione e alla modalità di connessione alla rete (EERE, n.d). Le turbine eoliche "terrestri" hanno dimensioni che vanno da 100 kilowatt a diversi megawatt. Le turbine più grandi sono più convenienti e vengono solitamente raggruppate in impianti eolici che forniscono energia alla rete elettrica. La seconda categoria è rappresentata dalle turbine eoliche *offshore*. Queste tendono ad essere più grandi di quelle terrestri e non presentano le stesse difficoltà di trasporto in quanto i grandi componenti sono trasportati su nave anziché su strade. Queste turbine sono in grado di catturare i potenti venti oceanici e di generare grandi quantitativi di energia elettrica. Infine, rispetto alla modalità di connessione alla rete (identico per il solare), quando le turbine eoliche di qualsiasi dimensione sono installate sul lato "cliente" del contatore elettrico, o sono installate nel luogo in cui l'energia generata verrà consumata, si parla di "eolico diffuso" (Ibidem).

Infine, la terza fonte rinnovabile per contributo (10,6%) è rappresentata dall'energia solare (IEA, 2022). Sebbene il contributo possa apparire modesto, l'energia solare, nello specifico il solare fotovoltaico, rappresenta la fonte energetica rinnovabile in più rapida crescita degli ultimi trent'anni, con un tasso di crescita medio annuale pari al 36% nel periodo 1990-2019 (IEA, 2022). Le tecnologie che consentono di generare energia dall'energia solare sfruttano le radiazioni solari che colpiscono giornalmente la superficie terrestre, rappresentando così una fonte inesauribile e abbondante di energia (SEIA⁷⁹, n.d) (ENEL, n.d).

Esistono diverse tecnologie per catturare le radiazioni solari e convertirle in energia utilizzabile in case, aziende, scuole e ospedali. Le principali tecnologie sono due e sono rappresentate da celle e pannelli fotovoltaici e sistemi a concentrazione solare o termodinamici (Turgeon e Morse, 2022). Al giorno d'oggi, il contributo del solare alla produzione di energia da fonti rinnovabili è da attribuire quasi totalmente al solare fotovoltaico, con un contributo nel 2019 dei sistemi a concentrazione solare pari appena allo 0,002% (IEA, 2022). Gli impianti fotovoltaici sono generalmente costituiti da pannelli solari, ovvero un insieme di decine o addirittura centinaia di celle solari (Turgeon e Morse, 2022). Ogni cella solare contiene un semiconduttore, solitamente di silicio. Quando il semiconduttore assorbe luce, libera gli elettroni, grazie al fenomeno fisico noto come "effetto fotovoltaico". Un campo elettrico dirige questi elettroni liberi in una corrente elettrica che scorre in una direzione. I contatti metallici in alto e in basso di una cella solare dirigono la corrente verso un oggetto esterno, che può essere piccolo come una calcolatrice o grande come una centrale elettrica (Turgeon e Morse, 2022) (ENEL, n.d).

I pannelli solari si dividono in tre categorie principali: monocristallino, policristallino e a film sottile. I pannelli solari con celle di tipo monocristallino sono i più efficienti in termini di rendimento e seguono un processo di produzione che crea un lingotto di silicio puro, non tossico e stabile (Lutz, 2022). Il silicio monocristallino viene poi tagliato dal lingotto per creare un "wafer" di silicio ad elevato rendimento e durevolezza, ma con costi più elevati. I pannelli solari policristallini sono invece realizzati con diversi cristalli di silicio anziché con uno solo. I frammenti di silicio vengono fusi e versati in uno stampo dal quale verranno ricavate le celle. Infine, con il rendimento, durevolezza e costo minori, vi sono i pannelli solari a film sottile. Tali pannelli prendono il nome dai sottili strati di materiali semiconduttori utilizzati, che includono il silicio, il tellururo di cadmio (CdTe) e il seleniuro

⁷⁹ Solar Energy Industries Association.

di rame indio gallio. Tali materiali vengono stesi come film su una superficie che costituiranno le celle, flessibili e di dimensioni potenzialmente più grandi (Ibidem).

Invece, i sistemi a concentrazione (detti anche “termodinamici”), trasformano l’energia del sole in elettricità con un ciclo simile a quello degli impianti termoelettrici tradizionali (ENEL, n.d). I forni solari sono un esempio di energia solare concentrata. Esistono diversi forni solari, tra cui le torri di energia solare, i trogoli parabolici e riflettori di Fresnel, i quali utilizzano lo stesso metodo generale per catturare e convertire l’energia (Turgeon e Morse, 2022). In questi impianti non esistono pannelli fotovoltaici, ma specchi che concentrano i raggi solari verso un punto preciso, chiamato ricevitore, che contiene un fluido termovettore adatto ad immagazzinare e trasportare il calore generato dai raggi solari. Tale elevato calore trasforma il fluido contenuto all’interno del ricevitore in vapore ad alta pressione, che viene convogliato attraverso dei condotti fino ad azionare una turbina. L’energia meccanica prodotta dalla turbina viene quindi trasmessa all’alternatore, che la trasforma in energia elettrica pronta per la distribuzione (Turgeon e Morse, 2022) (ENEL, n.d).

2.5.2. *Energia abbondante a zero emissioni*

Le fonti energetiche rinnovabili hanno il potenziale per creare molta più energia di quella di cui il mondo ha attualmente bisogno (*A future based on renewable energy*, 2022). L’abbondanza di tali fonti, non circoscritta a specifiche località geografiche, bensì diffuse su tutto il globo le rendono perfette per costituire la spina dorsale della transizione energetica verso un sistema *low-carbon* (IEA, 2021). È sufficiente pensare che, in un’ora, l’atmosfera terrestre riceve una quantità di luce solare sufficiente ad alimentare il fabbisogno di ogni essere umano sulla Terra per un anno (Turgeon e Morse, 2022). Tuttavia, a causa di uno sviluppo delle tecnologie non ancora distante dalle esigenze, questo potenziale non corrisponde a quanto possiamo ottenere attualmente (*A future based on renewable energy*, 2022). L’abbondanza delle fonti rinnovabili si lega ad un’altra caratteristica importante: l’inesauribilità (ENEL, n.d).

Oltre alla disponibilità, come già precedentemente menzionato, le fonti rinnovabili consentono di stabilizzare il prezzo dell’energia elettrica, grazie al minor utilizzo di fonti fossili, e dunque esponendosi in misura minore alle fluttuazioni di prezzi delle stesse (*Benefits of Renewable Energy Use*, 2008). Inoltre consentono di migliorare l’affidabilità e resilienza del sistema energetico locale e nazionale, grazie alla decentralizzazione della produzione energetica e riduzione delle importazioni energetiche. Infatti, le rinnovabili hanno un ruolo cruciale nel permettere la diversificazione del portafoglio energetico,

precursore essenziale per la sicurezza energetica e la transizione verso un sistema energetico sostenibile (Akrofi, 2021).

Un ulteriore vantaggio risiede nella modularità di alcune tecnologie, come ad esempio il solare fotovoltaico e l'eolico. Infatti, entrambe queste tecnologie hanno il vantaggio di poter essere implementate su scala ridotta da parte di privati cittadini per l'autoconsumo e, contestualmente, consentono una produzione di energia "diffusa" su tutta la rete elettrica (SEIA, n.d). A ciò si aggiunge che le case o le aziende che installano tali impianti ad uso proprio, possono effettivamente produrre elettricità in eccesso. In questo modo, tali "produttori" possono rivendere l'energia al fornitore di energia elettrica, riducendo o addirittura eliminando le bollette (Turgeon e Morse, 2022).

Oltre ai vantaggi finora esposti, vi è anche il carattere della flessibilità. Ad esempio, l'energia idroelettrica è una risorsa estremamente flessibile. Può fornire elettricità o immagazzinarla per soddisfare il fabbisogno energetico in tempo reale (Wagoner, 2017). Infatti, l'idroelettrico può essere considerato lo stabilizzatore di rete per eccellenza: fornisce rapidamente energia dopo un'interruzione, risponde ai picchi della domanda e mantiene i livelli di tensione e le frequenze corrette sulla rete. Inoltre, poiché l'idroelettrico è flessibile e può immagazzinare energia, è complementare ad altre forme di generazione. Come accade, l'impianto di pompaggio immagazzina l'elettricità in eccesso proveniente da fonti di carico di base⁸⁰ come il carbone o il nucleare, o fonti innovabili. Con l'entrata in funzione di altre forme di generazione variabile come l'eolico e il solare, l'energia idroelettrica può garantire che l'offerta di energia rimanga costante, anche quando il sole non splende o il vento è fermo. Contribuendo ad un mix energetico diversificato, l'energia idroelettrica protegge l'indipendenza energetica (Ibidem).

Ancora, le tecnologie rinnovabili hanno il vantaggio, rispetto alle tradizionali fonti fossili, di godere di bassi costi operativi e di manutenzione (Roser, 2020). Infatti, i costi dei combustibili fossili dipendono in larga misura da due fattori: il prezzo della materia prima e i costi operativi della centrale. Le centrali e gli impianti a energia rinnovabile sono diversi; il loro combustibile non deve essere estratto dal terreno, ma arriva senza sforzi, come la luce del sole o il vento (Ibidem). Per quel che riguarda i bassi costi di manutenzione, è esemplare l'utilizzo del solare fotovoltaico. Infatti, gli impianti fotovoltaici richiedono una

⁸⁰ Il carico di base è il livello minimo di domanda in un sistema di fornitura elettrica nell'arco delle 24 ore. Le fonti di energia per il carico di base sono gli impianti in grado di generare energia in modo affidabile e prevedibile per soddisfare costantemente la domanda. Queste fonti sono le fondamenta di un sistema elettrico solido (Gyamfi et al., 2018)

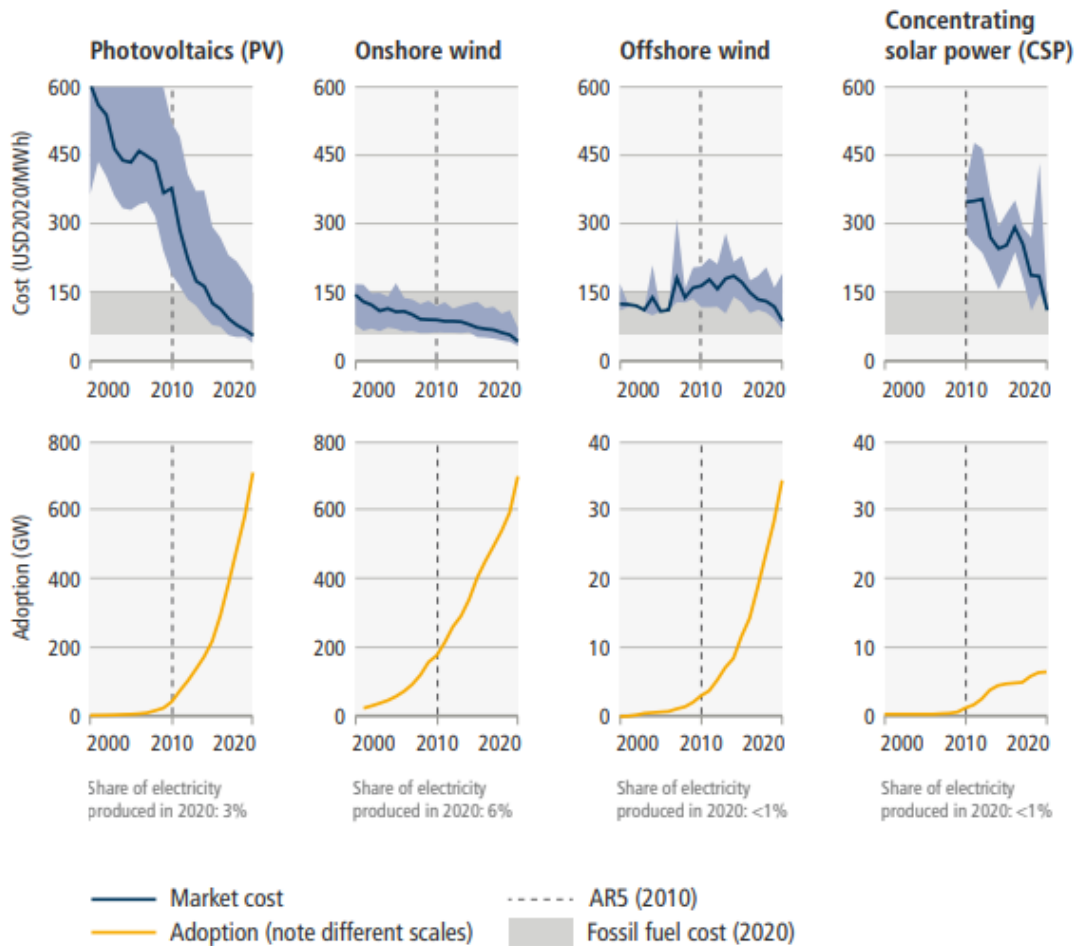
manutenzione relativamente ridotta (*Is Solar Energy Low Maintenance?*, 2018). Ciò si riflette nelle garanzie estese offerte dalla maggior parte dei produttori di energia solare, con garanzie contro i difetti in media di 20-25 anni. La ragione principale per cui è richiesta poca manutenzione è dovuta alla presenza di poche parti mobili. Una tecnologia che si basa su parti mobili è più soggetta ad usura a causa dell'utilizzo ripetuto e richiede una manutenzione regolare per mantenerne l'efficienza. Invece, la maggior parte degli impianti fotovoltaici richiedono poche (o nessuna) parti mobili, il che si traduce in una manutenzione ordinaria minima (Ibidem).

Connesso a questo ultimo paragrafo, vi è la tendenza delle fonti *low-carbon* di produrre energia a costi minori all'aumentare della scala dell'impianto (Roser, 2020). Infatti, queste tecnologie seguono curve di economie di scala ripide, mentre i combustibili fossili non lo fanno. Uno dei motivi principali è che le energie rinnovabili non hanno costi di combustibile e hanno, come appena appreso, costi operativi e di manutenzione relativamente bassi. Ciò significa che l'LCOE⁸¹ (*Levelized Cost of Energy*) delle energie rinnovabili scala con il costo delle loro tecnologie (Ibidem). I dati sull'LCOE confermano questa tendenza. Prendendo a riferimento impianti *utility-scale* (ossia su scala industriale), il solare fotovoltaico cristallino presenta un LCOE pari a \$30-\$41, e similmente quello a film sottile \$28-\$37. L'eolico *onshore* si attesta nell'intervallo \$26-\$50. Dall'altra parte, le fonti fossili registrano LCOE mediamente più elevati, con le centrali a turbogas nell'intervallo \$131-\$204, le centrali a carbone nell'intervallo \$65-\$152 e le centrali a gas a ciclo combinato nell'intervallo \$45-\$74 (Lazard, 2021).

LCOE così competitivi sono possibili anche grazie alla diminuzione costante dal 2010 dei costi unitari delle diverse tecnologie *low carbon* (IPCC, 2022). I pacchetti di politiche per l'innovazione hanno permesso di ridurre i costi e di sostenere l'adozione a livello globale. Sia le politiche su misura che le politiche globali che riguardano i sistemi di innovazione hanno contribuito a superare gli impatti distributivi, ambientali e sociali potenzialmente associati alla diffusione globale delle tecnologie a basse emissioni (Ibidem). La figura 2.14 evidenzia il calo dei costi avvenuto e l'aumento della capacità installata nell'ultimo decennio.

⁸¹ In italiano Costo livellato dell'elettricità, 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. Pertanto, restituisce una misura economica della competitività complessiva delle differenti tecnologie di produzione dell'energia elettrica, spesso aventi anche cicli di vita, dimensioni progettuali, costi del capitale, rischi e profittabilità differenti (ENEA, 2019).

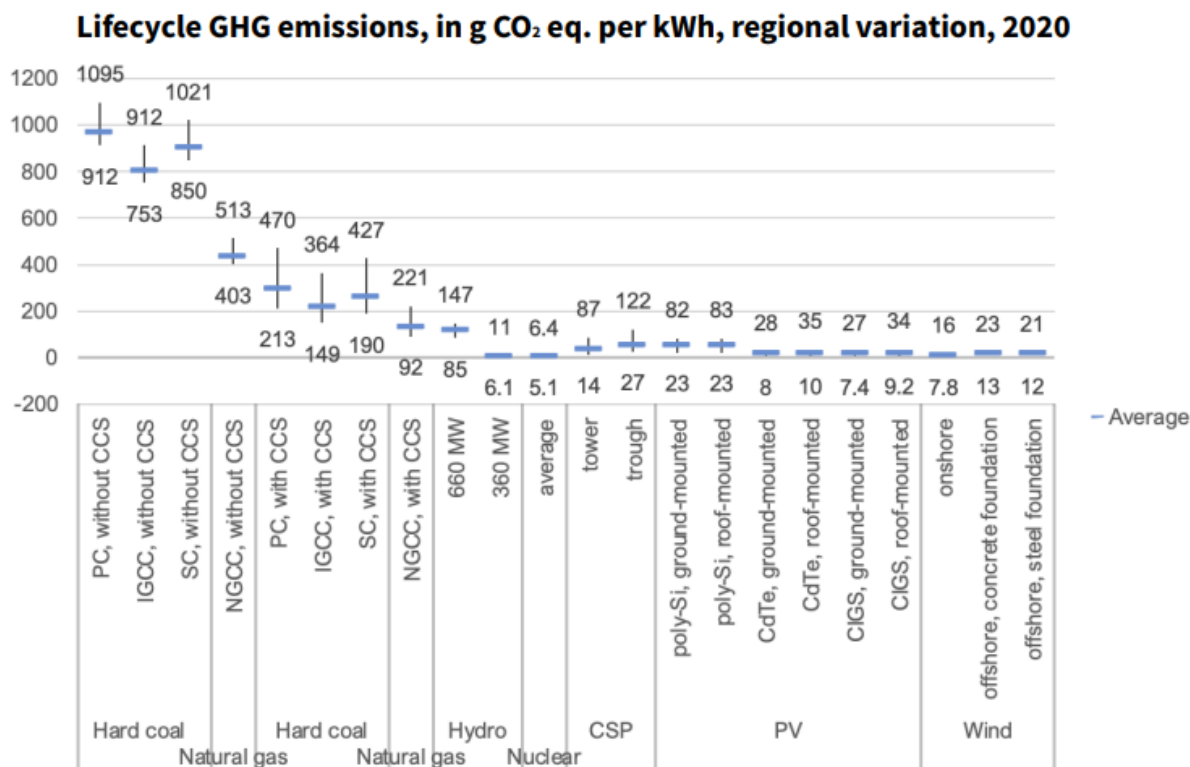
Figura 2.14 – Andamento dei costi unitari e capacità installata di alcune forme di energia rinnovabile.



Fonte: IPCC, 2022

Infine, ciò che rende le rinnovabili la spina dorsale della transizione energetica è l'assenza di emissioni di carbonio e di emissioni di inquinanti tossici e pericolosi per la salute (*Benefits of Renewable Energy Use*, 2008). Ad eccezione delle biomasse, le fonti energetiche rinnovabili producono poche o nessuna emissione. Anche includendo le emissioni del “ciclo di vita” dell'energia prodotta (cioè le emissioni derivanti da ogni fase della vita di una tecnologia, ossia produzione, installazione, funzionamento e smantellamento), le emissioni clima-alteranti associate a queste fonti sono minime (Ibidem). Osservando i numeri nella Figura 2.15, il confronto diventa chiaro.

Figura 2.15 – Intervalli di emissione di gas serra nel ciclo di vita delle tecnologie selezionate. Dati espressi in g CO₂ eq/kWh.



Fonte: UNECE⁸², 2021

Sebbene i sistemi di *Carbon Capture and Storage* (CCS) possano ridurre significativamente le emissioni di gas serra, non sono sufficienti ad eguagliare i risultati dimostrati dalle fonti rinnovabili e dal nucleare, quest’ultimo presentando il dato più contenuto del confronto (UNECE, 2021). La maggior parte delle emissioni di gas serra delle tecnologie rinnovabili è incorporata nelle infrastrutture (fino al 99% per il solare fotovoltaico), il che suggerisce forti variazioni negli impatti del ciclo di vita dovute all’origine delle materie prime, al mix energetico impiegato per la produzione, alle modalità di trasporto nelle varie fasi di produzione e installazione, ecc. Poiché gli impatti sono incorporati nel capitale, il fattore di carico e la durata di vita prevista dell’impianto/tecnologia, questi rappresentano naturalmente parametri molto influenti sul punteggio finale, che può diminuire significativamente se l’infrastruttura è più duratura del previsto (Ibidem).

2.5.3. Intermittenza e dipendenza da terre rare

“Da settimane, gli 1,1 milioni di impianti solari presenti in Germania producono quantitativi di elettricità pressoché nulli. Le giornate sono corte, il tempo è brutto

⁸² United Nations Economic Commission for Europe

e il cielo è coperto. Come spesso accade in inverno, tutti i pannelli solari hanno smesso di produrre elettricità più o meno contemporaneamente. Per evitare carenze di energia, la Germania deve attualmente importare grandi quantità di elettricità generata dalle centrali nucleari in Francia e nella Repubblica Ceca. Per compensare la temporanea perdita di energia solare, l'operatore di rete Tennet ha fatto ricorso a un piano di riserva di emergenza, alimentando un vecchio impianto a olio combustibile nella città austriaca di Graz.

- Alexander Neubacher, *Der Spiegel*, 18 gennaio 2012

In tutto il mondo, la capacità di produzione di energia rinnovabile è aumentata drasticamente grazie al calo dei prezzi, delle politiche a favore delle energie rinnovabili e della preoccupazione per le emissioni di gas serra causate dalla combustione di fonti fossili (Gowrisankaran et al., 2016). Uno problema fondamentale della generazione di energia da fonti rinnovabili è l'intermittenza: i generatori solari producono solo quando c'è il sole, le pale eoliche producono solo se c'è vento e le centrali idroelettriche possono entrare in funzione solo se è presente sufficiente acqua. L'intermittenza ha il potenziale per influenzare enormemente il valore economico o equivalentemente i costi sociali dell'energia rinnovabile. La citazione di *Der Spiegel* sopra riportata suggerisce che gli operatori dei sistemi elettrici devono avere a disposizione piani di generazione di riserva, spesso costosi, per supplire all'intermittenza e limitare i costi sociali (Ibidem).

L'intermittenza della produzione, oltre a sottolineare la dipendenza delle fonti rinnovabili dalle condizioni meteorologiche, porta alla luce un secondo grande problema: lo stoccaggio dell'energia (Simons et al., 2021). L'accumulo di energia rinnovabile su larga scala è un'area tecnologica relativamente giovane che è cresciuta rapidamente con l'aumento della domanda globale di più energia da fonti che riducono il contributo delle attività umane alle emissioni di gas serra (Ibidem). Per quel che concerne l'immagazzinamento dell'energia, oltre agli impianti idroelettrici a pompaggio precedentemente menzionati, le batterie agli ioni di litio (Li-ion) hanno guadagnato un grande slancio grazie al loro potenziale di densità energetica maggiore (Thejo Kalyani e Dhoble, 2021). Tuttavia, sono necessari nuovi materiali con elevata capacità specifica e prestazioni ad alta velocità. Infatti, sebbene le batterie agli ioni di litio rappresentino la batteria più diffusa oggi costituendo oltre il 90% delle tecnologie di stoccaggio, e presente in tutti i dispositivi con batterie ricaricabili come smartphone, pc e macchine elettriche, alcune problematiche non possono essere ignorate (Kobayashi-Solomon, 2022). Il principale problema è la scarsità della materia prima:

l'offerta di litio deve affrontare sfide non solo per l'aumento della domanda, con settori in competizione per l'accaparramento della risorsa, ma anche perché le riserve di litio sono concentrate in pochi luoghi e oltre la metà della produzione attuale si trova in aree ad alto stress idrico (Shine, 2022). Si stima che per la produzione di un chilo di litio servano dai 400 ai 2 milioni di litri d'acqua. Esempio è il caso del Deserto di Atacama in Chile, uno dei deserti più aridi della Terra che, con riserve stimate pari a 8 milioni di tonnellate di litio, fornisce circa un terzo del litio prodotto a livello mondiale (Halper, 2022). La "salamoia" (in inglese *brine*) ricca di sali, tra cui cloruro di sodio, di magnesio e di litio, viene estratta dal sottosuolo e fatta evaporare per recuperare il carbonato di litio e altri sali (Obbekær, 2019). Solo nel 2019, nel Deserto di Atacama sono stati "consumati" 63 miliardi di litri per la produzione di litio, togliendo una risorsa preziosa da un ambiente già estremamente arido e alle comunità agricole da cui dipende la loro sopravvivenza (Ibidem). Oltre alla scarsità della materia prima va menzionato il rischio di rilascio di sostanze chimiche tossiche durante l'estrazione, lavorazione e difficoltoso riciclo, nonché la vita operativa effettiva delle batterie Li-ion relativamente breve e la loro sensibilità al calore e al freddo estremi (Kobayashi-Solomon, 2022).

La forte domanda di litio, secondo l'International Energy Agency, si tradurrà in possibili carenze già nel 2025 (Shine, 2022). L'obiettivo dello Zero Netto entro il 2050 vedrà necessario lo sviluppo di nuove tecnologie di stoccaggio che allevino lo stress posto sull'utilizzo e produzione di litio (Ibidem). In breve, l'accumulo di energia rappresenta la sfida e la chiave per sbloccare il pieno potenziale delle energie rinnovabili (Singhvi, 2022). Un ulteriore punto a sfavore delle rinnovabili, dato l'attuale rendimento delle stesse, è la densità energetica inferiore rispetto ai combustibili fossili e al nucleare (Eberhart, 2020). Ciò significa che richiedono maggiori volumi di materie prime ed estensioni di terreno per produrre lo stesso quantitativo di elettricità rispetto a fonti energeticamente più dense. Tale caratteristica delle rinnovabili aggrava le attuali sfide di politica ambientale, dell'aumento della concorrenza sui terreni, dei costi delle materie prime e con conseguenze non indifferenti sull'impatto visivo e deturpamento paesaggistico (van Zalk e Behrens, 2018) (Roth et al., 2018). Ad esempio, la benzina è 10^{15} volte più densa di energia della radiazione solare e un miliardo di volte più densa di energia dell'energia eolica. Il risultato è che esistono limiti alla quantità di energia che possiamo estrarre dalle fonti rinnovabili rispetto alla quantità di superficie necessaria per la produzione (Eberhart, 2020). Diverse analisi del ciclo di vita confermano che l'energia eolica, solare e idroelettrica richiedono regolarmente

più materie prime, tra cui ferro, rame, alluminio e cemento, per unità di energia prodotta rispetto alla generazione elettrica a carbone e a gas (Ibidem).

Connessa all'utilizzo di materie prime vi è la dipendenza delle tecnologie di produzione da fonti rinnovabili dall'utilizzo di terre rare per il proprio funzionamento (MacDonald, 2019). Infatti, gli elementi delle terre rare sono utilizzati praticamente in tutta l'elettronica. Ciò include i pannelli solari, che richiedono metalli di terre rare come l'ittrio o l'europio, e l'energia eolica, che utilizza grandi quantità di neodimio nei magneti che aiutano a convertire l'energia eolica in elettricità (MacDonald, 2019) (IEA, 2021). Gli impianti fotovoltaici, i parchi eolici e i veicoli elettrici richiedono generalmente più minerali ed elementi delle terre rare per essere costruiti rispetto alle loro controparti basate sui combustibili fossili. Una tipica auto elettrica richiede un rapporto di minerali e terre rare sei volte superiore a quello di un'auto convenzionale e un impianto eolico *onshore* richiede risorse minerali e terre rare nove volte superiori ad un impianto a gas. Dal 2010, la quantità media di minerali e terre rare necessarie per una nuova unità di capacità di generazione di energia è aumentata del 50% con l'aumento della quota di rinnovabili nei nuovi investimenti (IEA, 2021).

Gli elementi delle terre rare sono in realtà abbastanza abbondanti nella crosta terrestre. Tuttavia, questi elementi si trovano in concentrazioni estremamente basse (MacDonald, 2019). Ciò significa che l'estrazione mineraria è molto distruttiva per ottenere quantitativi esigui di materia utile, producendo grandi quantità di rifiuti minerari contaminanti e creando un problema di smaltimento (MacDonald, 2019) (Eberhart, 2020). Inoltre, molte delle miniere di terre rare più produttive si trovano in Paesi con normative ambientali e di tutela dei lavoratori deboli. L'instabilità politica e i problemi di sicurezza nazionale rappresentano ulteriori rischi per l'approvvigionamento a lungo termine. Di conseguenza, il riciclaggio di questi elementi è un grande business, che impiega migliaia di lavoratori perlopiù non qualificati in tutto il mondo (MacDonald, 2019). Per smontare e riciclare i materiali in modo sicuro sono necessari processi di riciclaggio formali e supervisionati, a differenza dei sistemi di riciclaggio informali attualmente in uso. Questi sistemi informali sono più economici, ma possono esporre i lavoratori a rischi per la salute (Ibidem).

Infine, guardando le singole tecnologie, merita un'analisi più approfondita l'impatto effettivo generato dall'energia idroelettrica. Questa è spesso inserita nell'insieme delle fonti energetiche a basso impatto, ma nella realtà le dighe e i bacini di raccolta dell'acqua risultano tra i maggiori responsabili delle emissioni di gas serra al mondo, oltre che la fonte di altri impatti socio-ambientali (Hudson, 2017) (WWF, n.d). Fino a poco tempo fa si

riteneva che il 20% di tutte le emissioni di metano prodotte dall'uomo provenisse dalla superficie dei bacini artificiali. Uno studio di Deemer et al. pubblicato su *BioScience* alla fine del 2016 ha stabilito che le dighe e i bacini artificiali contribuiscono al riscaldamento globale il 25% in più di quanto stimato in precedenza. Gli autori dello studio hanno calcolato che i bacini artificiali emettono nell'atmosfera l'equivalente di 1 Gt, ovvero un miliardo di tonnellate di CO₂ all'anno. Si tratta di una produzione di gas serra superiore a quella dell'intera nazione del Canada e di poco inferiore alla quantità di emissioni di gas serra attribuibili al Brasile (Hudson, 2017). Nello specifico, lo sbarramento dei fiumi e la costruzione di dighe e bacini artificiali di grandi dimensioni comporta l'inondazione di vaste aree di terreno che contengono una grande quantità di vita e materia organica. Si creano così le condizioni perfette affinché i batteri, in un ambiente povero di ossigeno, si nutrano della materia organica e, attraverso la decomposizione anaerobica, generare gas metano (Ibidem). Oltre all'impatto sull'effetto serra, l'allagamento dei terreni per la costruzione di un bacino idroelettrico ha un impatto ambientale estremo perché: distrugge foreste, habitat della fauna selvatica, terreni agricoli, paesaggi ed impedisce la migrazione delle specie ittiche per la ricerca di cibo e riproduzione (Yardley, 2007) (WWF, n.d). In molti casi, come nel caso della diga delle Tre Gole in Cina, è stato necessario trasferire intere comunità per fare posto al bacino idrico (Yardley, 2007).

2.6. *La fissione nucleare*

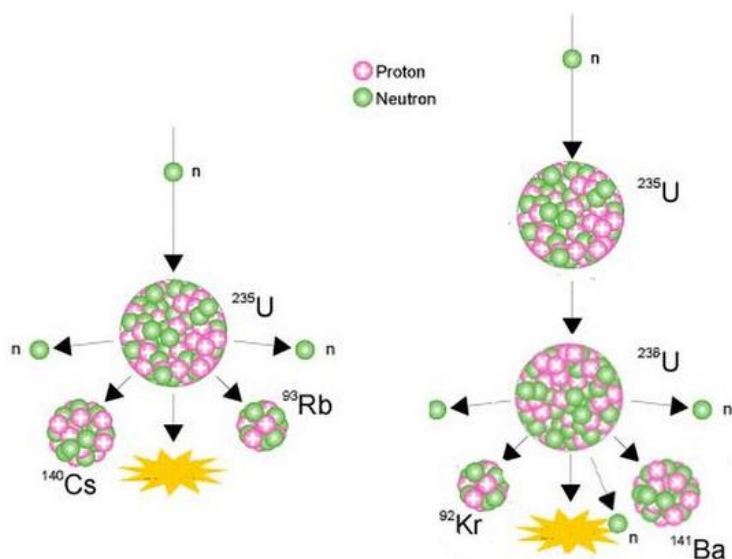
L'energia nucleare da fissione è storicamente una delle maggiori fonti globali di elettricità priva di emissioni di carbonio, tuttavia, nonostante tale pregio, si trova di fronte a un futuro contrastato e non privo di dibattito (IEA, 2022). Nel 2019, il nucleare ha contribuito al 4,3% del fabbisogno energetico mondiale e, attualmente, concorre a generare circa il 10% dell'elettricità consumata globalmente (BP, 2020) (IEA, 2022). Inoltre, in utilizzo da oltre 50 anni, il nucleare ha evitato ad oggi circa 66 Gt di emissioni di CO₂ a livello globale, riducendo la necessità di carbone, gas naturale e petrolio (IEA, 2022). Senza il nucleare, le emissioni di CO₂ del settore energetico nelle economie avanzate sarebbero aumentate del 20% negli ultimi 50 anni, con in testa gli Stati Uniti e l'Unione Europea (Ibidem). Sebbene siano evidenti i vantaggi dovuti alla produzione non intermittente di energia pulita in grandi quantità, disastri come quelli verificatisi a Chernobyl e Fukushima e il problema della gestione delle scorie ridimensionano l'accettabilità di tale tecnologia (Unwin, 2019) (IEA, 2022).

Mentre alcuni Paesi stanno eliminando gradualmente le centrali nucleari a causa dell'opposizione dell'opinione pubblica e delle preoccupazioni relative alla sicurezza, altri 19 Paesi stavano costruendo nuovi impianti nucleari all'inizio del 2021, prospettando un ruolo futuro per l'energia nucleare (IEA, 2022).

2.6.1. Il processo di fissione nucleare

Una centrale nucleare è un impianto costituito da una serie di impianti di cui il più importante è rappresentato dal reattore nucleare, dove avviene il processo di fissione nucleare che lo alimenta (Rutledge et al., 2022). Tale processo è alimentato dalla scissione degli atomi, in cui una particella (un neutrone) viene sparata contro un atomo, che si divide in due atomi più piccoli e in alcuni neutroni aggiuntivi (WNA, n.d). Alcuni dei neutroni rilasciati colpiscono poi altri atomi, causando la fissione di questi ultimi e il rilascio di altri neutroni, scatenando così una reazione a catena (Ibidem). Il combustibile che i reattori nucleari utilizzano per generare la fissione nucleare è costituito da pellet di uranio U^{235} (Rutledge et al., 2022). Nel reattore, gli atomi di U^{235} sono costretti a rompersi. Quando si dividono, gli atomi rilasciano piccole particelle chiamate prodotti di fissione, come mostrato nella Figura 2.16.

Figura 2.16 – Due esempi di fissione nucleare dell'uranio U^{235} , il combustibile più comunemente usato nei reattori nucleari.



Fonte: WNA, n.d

I prodotti di fissione dalla rottura dell'atomo di U^{235} possono essere costituiti da un atomo di cesio Cs^{140} , un atomo di rubidio Rb^{93} , due neutroni ed energia, oppure da un atomo di Kripton Kr^{92} , un atomo di bario Ba^{141} , 3 neutroni ed energia (Galindo, 2022). La reazione a

catena rilascia grandi quantità di energia sotto forma di calore. Il calore può essere convertito in elettricità in una centrale nucleare, analogamente a come il calore dei combustibili fossili come carbone, gas e petrolio viene utilizzato per generare elettricità (WNA, n.d) (Galindo, 2022). Il calore generato dalla fissione nucleare riscalda l'agente di raffreddamento del reattore, solitamente acqua, ma a volte rappresentato da metallo liquido o sale fuso (Rutledge et al., 2022). L'agente refrigerante, riscaldato dalla fissione nucleare, produce vapore che fa girare le turbine che, connesse a dei generatori, creano elettricità pronta per l'immissione nella rete elettrica (Rutledge et al., 2022) (Galindo, 2022). Per regolare la quantità di energia prodotta, e di conseguenza di elettricità, si fa ricorso a delle barre contenenti materiali definiti veleni nucleari. Questi sono materiali, come Xenon, Cadmio, Boro e Hafnio, che assorbono alcuni dei prodotti di fissione nucleare (Rutledge et al., 2022). Più barre di veleno nucleare sono presenti durante la reazione a catena, più lenta e controllata sarà la reazione. Rimuovendo le barre, la reazione a catena sarà più forte e creerà più elettricità (Ibidem).

Ai fini dell'attività della centrale nucleare, assume un ruolo vitale il processo di rifornimento del reattore nucleare. Le centrali nucleari funzionano quasi sempre e si riforniscono solo una volta ogni 18 mesi o ogni 2 anni circa (Conca, 2015) (Wald, 2020). Le interruzioni si verificano in genere in primavera o in autunno, quando la domanda di elettricità è più bassa e il riscaldamento invernale o l'aria condizionata estiva sono scarsi. L'interruzione del flusso costante di energia è inoltre più facilmente gestibile da altre fonti durante la primavera, come l'idroelettrico, che sfrutta lo scioglimento della neve accumulata nel corso dell'inverno (Conca, 2015).

Da un punto di vista operativo, gli addetti aprono il contenitore del reattore e, utilizzando una gru e altri strumenti, spostano circa un terzo delle barre di combustibile più vecchie in una piscina per il combustibile esausto, rimescolano i fasci più recenti ancora nel reattore e ne aggiungono di nuovi (Wald, 2020). Il combustibile stesso viene ordinato, prodotto e consegnato all'impianto diversi mesi prima del rifornimento. Il reattore viene caricato con uranio sottoforma di pellet di ceramica, che riempiono un lungo tubo di metallo per formare le barre di combustibile. Queste vengono impacchettate insieme, con una grande maniglia in cima che può essere afferrata da una gru (Ibidem). Un'interruzione di solito dura circa 40 giorni, quindi una volta ogni due anni significa che l'impianto funziona circa il 95% del tempo, producendo elevati livelli di energia in maniera costante (Conca, 2015).

2.6.2. *Energia pulita, abbondante e costante*

A differenza dei combustibili fossili tradizionali come il carbone, l'energia nucleare produce virtualmente zero emissioni, e livelli minori o uguali alle fonti rinnovabili considerando il ciclo di vita della tecnologia⁸³ (Unwin, 2019). Infatti, la Figura 2.15 (pag. 82), che mostra gli intervalli di emissione di gas serra nel ciclo di vita delle tecnologie, pone il nucleare nella veste di fonte energetica più pulita in termini di emissioni di carbonio per kWh (UNECE, 2021). Lo sviluppo e potenziamento del nucleare nel portafoglio energetico rappresenterebbe una possibile soluzione all'aumento delle emissioni globali di carbonio e una soluzione coerente con l'obiettivo dell'IPCC di mantenere l'aumento delle temperature globali ben al di sotto dei 2°C rispetto ai livelli preindustriali, auspicabilmente entro 1,5°C (WNA, n.d). Il ricorso al nucleare ha già dato un considerevole contributo all'ambiente, evitando un rilascio di quasi 70 Gt di CO₂ nell'atmosfera, pari a circa due anni di emissioni mondiali provenienti dal settore energetico (IEA, 2022).

Oltre alle ridotte emissioni di CO₂, l'energia nucleare è una fonte energetica molto densa e dal potere calorifico estremamente elevato, come riportato dalla Tabella 2.2 (pag. 45) (IEA et al., 2004) (European Nuclear Society, n.d). Infatti, poiché i legami nucleari all'interno degli atomi contengono così tanta energia, le centrali nucleari possono produrre più energia con meno combustibile rispetto a qualsiasi altra tecnologia attualmente utilizzata (White and Krol, 2020). Per fare un paragone che renda l'idea della densità energetica dell'U²³⁵, l'energia nucleare potrebbe soddisfare il fabbisogno energetico nell'arco della vita di un americano medio con una quantità di combustibile che starebbe in una lattina di soda (Ibidem). Sempre per sottolineare l'enorme quantità di energia che può essere sprigionata, un grammo di Uranio contenete solo il 3% di U²³⁵ può liberare un'energia equivalente a quella prodotta dalla combustione di 300-3.000 kg di carbone. Il valore preciso dipende da diversi fattori tecnici, ma quello che si vuole evidenziare è, che a parità di peso, liberiamo da trecentomila a tre milioni di volte più energia dalla fissione di una certa massa di uranio rispetto a quella che otteniamo dalla combustione di un'eguale massa di carbone (ENI, n.d). Alla densità energetica si affianca un ulteriore punto di forza che differenzia il nucleare dalle rinnovabili: la produzione non intermittente di energia elettrica. La fissione nucleare è l'unica fonte energetica sviluppata in grado di fornire le enormi quantità di energia che

⁸³ L'analisi del ciclo di vita (in questo caso dei sistemi energetici) è un metodo che mira a quantificare l'impatto ambientale e sulla salute umana delle diverse fasi del ciclo di vita di una tecnologia/fonte energetica, che vanno dall'estrazione delle materie prime dal suolo all'utilizzo del vettore energetico per svolgere il lavoro (DOE, n.d).

saranno necessarie per far funzionare le moderne società in modo sicuro, economico, affidabile e sostenibile (Brook et al., 2014). Il nucleare rappresenta un esempio perfetto di fonte energetica adatta a garantire il carico di base⁸⁴, rafforzando il sistema energetico locale e/o nazionale. Ci sono ragioni sia tecniche ed economiche per cui questo è vero. Tecnicamente, le centrali nucleari non possono essere spente ed accese semplicemente premendo un interruttore, dunque forniscono energia 24 ore su 24, 7 giorni su 7, perché devono funzionare in maniera continuativa (ad eccezione dei periodi di manutenzione programmata) (Dutzik, 2011). Da un punto di vista economico invece, le centrali nucleari sono impianti molto costosi da costruire ma molto economici da gestire. Il potenziale costruttore dell'impianto, dunque, deve avere la garanzia di poter vendere grandi quantitativi di energia alla rete per rientrare dell'investimento iniziale. Di conseguenza, una centrale nucleare funzionerà sempre al massimo delle sue possibilità (Ibidem). Per garantire il carico di base, l'enfasi dovrebbe essere posta sulla conversione della maggior parte della capacità di produzione di energia elettrica dai combustibili fossili alla fissione nucleare (Brook et al., 2014).

La presenza del nucleare nel proprio portafoglio energetico nazionale consente di migliorare non solo le proprie emissioni, ma anche di perseguire politiche di sicurezza energetica più solide (WNA, 2022). Dopo la pandemia di Covid-19 e l'inizio della guerra tra Ucraina e Russia nel 2022, i governi sono diventati più consapevoli delle vulnerabilità delle catene di approvvigionamento transfrontaliere in settori chiave. Questa rivalutazione dei rischi legati al commercio ha stimolato gli sforzi per aumentare la sicurezza energetica e, in generale, la sicurezza della catena di approvvigionamento (Ibidem). Le crisi energetiche del 1970 hanno portato a una grande espansione della capacità nucleare, stimolando i Paesi a cercare di diversificare il portafoglio energetico e di ridurre la dipendenza dalla continua importazione di grandi volumi di combustibili fossili e relativa volatilità dei prezzi, come fece la Francia, con grandi investimenti nel nucleare tra anni '70 e '80 (Brook et al., 2014) (WNA, 2022). Per molti Paesi, la valutazione degli eventi recenti e, in particolare, l'impennata dei prezzi dei combustibili fossili, ha portato a decisioni simili che potrebbero portare a un ruolo maggiore per l'energia nucleare (WNA, 2022).

⁸⁴ È la quantità minima di energia elettrica erogata o richiesta in un determinato periodo di tempo ad un ritmo costante (EIA, n.d)

2.6.3. Costi di costruzione elevati e radioattività nociva

Alla pari di carbone, petrolio e gas naturale, e raro allo stato naturale, l'Uranio è una risorsa non rinnovabile, anche se piccole quantità del suo isotopo U^{235} sono capaci di generare quantità eccezionali di energia (API, n.d).

Allo stesso modo, sebbene si possa temere il “picco dell'Uranio” o il relativo esaurimento, un'analisi delle riserve identificate ed economicamente recuperabili indica che la disponibilità di combustibile è sufficiente per la transizione energetica dei prossimi decenni (*Uranium Supply is Not a Significant Constraint...*, 2022). Al 2019, L'IAEA⁸⁵ e la NEA⁸⁶ hanno rilevato che le risorse totali misurate disponibili per l'estrazione a prezzi inferiori a 130 dollari/kgU (il prezzo più alto degli ultimi vent'anni) sono pari a 3,8 milioni di tU⁸⁷. Inoltre, hanno trovato ulteriori risorse dedotte⁸⁸ di 2,4 milioni di tU, per un livello totale di 6,2 milioni di tU probabilmente disponibili per utilizzo futuro a livelli di prezzo moderati. Complessivamente si tratta di una quantità sufficiente a soddisfare 100 anni di domanda attuale e più di 40 anni in scenari di domanda elevata (Ibidem). Questa stima della disponibilità di uranio, tuttavia, riflette solo le riserve conosciute. Decenni di prezzi dell'uranio persistentemente bassi hanno limitato la prospezione e l'esplorazione commerciale dei giacimenti di Uranio in tutto il mondo (Ibidem). Tuttavia, sebbene le riserve possano aumentare in futuro, ciò non toglie che l'Uranio rappresenti una risorsa finita a cui importanti innovazioni tecnologiche o nuove tecnologie dovranno subentrare per supplire o sostituire la fissione nucleare una volta consumate le riserve economicamente estraibili.

L'Uranio, oltre ad essere una risorsa finita, ha riserve consistenti concentrate in pochi Paesi. Infatti, oltre l'80% dell'Uranio utilizzato a livello mondiale è prodotto da soli cinque Paesi (Jawerth, 2018). Dei 30 Paesi che gestiscono 451 reattori nucleari, pochi producono Uranio. Ciò significa che più di 50.000 tonnellate di concentrato di minerale di Uranio vengono movimentate ogni anno, con conseguenti rischi nella catena di approvvigionamento e di sicurezza energetica (Ibidem). I Paesi che hanno maggiormente soddisfatto la domanda di uranio nel 2021 sono stati: Kazakistan (45%), Namibia (12%) e Canada (10%) (WNA, 2022). Per quel che concerne le riserve mondiali provate al 2019, i 5 Paesi che ne vantano in misura maggiore sono: Australia (28%), Kazakistan (15%), Canada (9%), Russia (8%) e

⁸⁵ International Atomic Energy Agency.

⁸⁶ Nuclear Energy Agency.

⁸⁷ Tonnellata di Uranio.

⁸⁸ Risorse la cui esistenza è solo ipotizzata in base a considerazioni geologiche (USGS, n.d).

Namibia (7%). Questi 5 Paesi, da soli, detengono due terzi delle riserve provate a livello mondiale di questa preziosa risorsa (Ibidem).

Al di là dei problemi legati alla scarsità della risorsa, un'importante punto a sfavore del ricorso all'energia nucleare è rappresentato dagli elevati costi iniziali per la costruzione di una centrale nucleare (Unwin, 2019). Infatti, la costruzione richiede svariati miliardi di dollari, oltre agli enormi costi aggiuntivi per la manutenzione dell'impianto, rendendo il nucleare una soluzione praticabile solo nelle economie più sviluppate (Ibidem). All'inizio del 2017, la World Nuclear Association (WNA) ha pubblicato il rapporto "Nuclear Power Economics and Project Structuring". Il rapporto rileva che l'economia delle nuove centrali nucleari è fortemente influenzata dal costo del capitale, che rappresenta almeno il 60% del loro LCOE (WNA, 2022). Infatti, il costo dell'energia nucleare va suddiviso tra costi di capitale e costi operativi. I costi di capitale comprendono la preparazione del sito, l'ingegneria, la produzione, la costruzione, la messa in funzione e il finanziamento (Iurshina et al., 2019). I costi operativi comprendono i costi del combustibile (dall'estrazione dell'uranio alla fabbricazione del combustibile), la manutenzione, lo smantellamento e lo smaltimento delle scorie. I costi di capitale di una centrale nucleare sono molto più elevati rispetto a quelli di fonti energetiche come il carbone e il gas naturale, e il costo annuale di rimborso dell'investimento iniziale è sostanzialmente più alto dei costi operativi annuali. Questo perché le centrali nucleari sono tecnicamente più complesse e devono soddisfare requisiti di autorizzazione e progettazione più stringenti. La progettazione e la costruzione di una nuova centrale nucleare richiede molti specialisti altamente qualificati e spesso richiede molti anni, aggravando i costi di finanziamento, che possono diventare significativi. Modifiche alla progettazione o cause legali possono causare ritardi che aumentano ulteriormente gli oneri di finanziamento, che in alcuni casi superano i costi di costruzione effettivi (Ibidem). La tendenza globale si sta spostando verso progetti con standard comuni, che riducono le incertezze progettuali e costruttive, nonché i tempi di costruzione dei reattori futuri, riducendo così i costi di capitale (Ibidem)

A rendere controverso l'utilizzo dell'energia nucleare e oggetto di dibattito è soprattutto il rischio associato alle fughe radioattive derivanti dalle scorie nucleari e da possibile fusione del nocciolo (Unwin, 2019) (Ritchie, 2022). Il sottoprodotto dell'energia nucleare è il materiale radioattivo. Quest'ultimo è costituito da un insieme di nuclei atomici instabili, che perdendo la loro energia, influenzano e contaminano quello che gli sta attorno, compresi gli organismi e l'ambiente (Rutledge et al., 2022). Il materiale radioattivo può essere estremamente tossico, causando ustioni e aumentando il rischio di tumori, malattie del

sangue e decadimento osseo, e nei casi più gravi, la morte. Infatti, le radiazioni danneggiano le cellule che, esposte a livelli di radiazioni oltre una certa soglia, vengono danneggiate a livello di DNA o muoiono del tutto (Rutledge et al., 2022) (EPA, 2022). Il combustibile usato e le barre di veleno nucleare sono estremamente radioattivi. I pellet di uranio devono essere conservati in contenitori speciali (Rutledge et al., 2022).

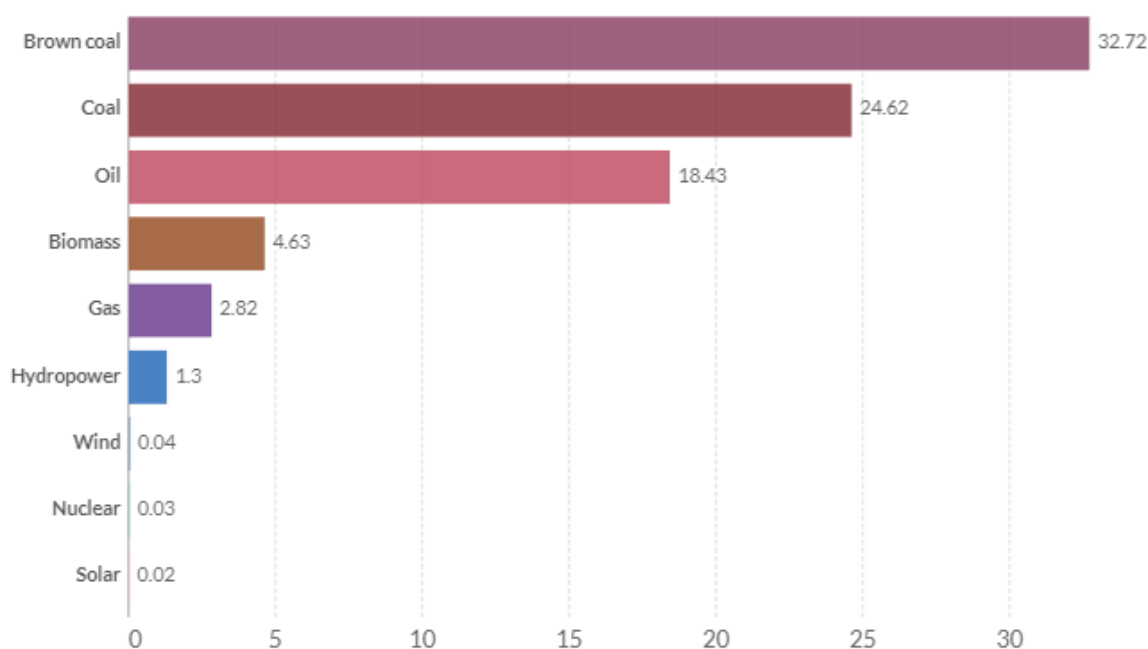
La radioattività delle scorie nucleari decade naturalmente e ha una radiotossicità finita (WNA, 2022). Entro un periodo di 1.000-10.000 anni, la radioattività delle scorie decadono fino a raggiungere quella del minerale originariamente estratto. Tuttavia, per alcune scorie altamente radioattive è stato stimato un tempo di decadimento che sfiora un tempo pari a un milione di anni (Ro, 2019). La pericolosità dipende dalla concentrazione. La maggior parte dei rifiuti nucleari prodotti è pericolosa, a causa della loro radioattività, solo per poche decine di anni e viene smaltita di routine in impianti di smaltimento in prossimità della superficie (WNA, 2022). Solo un piccolo volume di scorie nucleari (3% circa del totale) è a lunga vita e altamente radioattivo e richiede l'isolamento dall'ambiente per molte migliaia di anni. Solitamente è il caso del combustibile esausto e delle barre di veleno nucleare (Ro, 2019) (WNA, 2022). È questo il problema che desta maggiore preoccupazione e che solleva le maggiori polemiche rispetto al nucleare: la gestione senza soluzioni di breve termine delle scorie nucleari (WNA, 2022). Tutte le tecnologie e precauzioni necessarie vengono implementate nella delicata fase di stoccaggio, messa in sicurezza ed isolamento delle scorie; dunque si tratta di una questione di accettabilità pubblica più che di fattibilità tecnologica (Ibidem). Attualmente, le opzioni di stoccaggio si dividono in due macrocategorie: smaltimento in prossimità della superficie e smaltimento geologico in profondità. Quest'ultima categoria si suddivide ulteriormente in depositi estratti (250-500 m di profondità) e pozzi profondi (5.000 m di profondità) (WNA, 2021).

Una specifica fase della gestione delle scorie preoccupa l'opinione pubblica: il trasporto dei rifiuti radioattivi, che comporta un rischio inaccettabile per le persone e per l'ambiente (WNA, 2022). La spedizione di materiale radioattivo è altamente regolamentata. La quantità e il tipo di radioattività presente nella spedizione determinano le modalità di trasporto e il tipo di controlli necessari (EPA, 2022). Alcuni materiali a bassissima radioattività possono essere spediti senza controlli o con controlli molto limitati. Invece, i materiali altamente radioattivi, potenzialmente pericolosi per la popolazione, richiedono percorsi controllati, maggiore sicurezza e notifiche alle autorità statali. I mezzi impiegati per il trasporto sono: automezzi, treni, navi e aerei (Ibidem). I materiali ad altissima radioattività, come il combustibile nucleare esausto, devono essere trasportati in contenitori appositamente

progettati, chiamati *cask*. Questi contenitori sono progettati per contenere il materiale radioattivo ad alto livello in caso di incidente. Prima di essere utilizzati, i *cask* sono sottoposti a un serie di test estremi, quali: collisioni con oggetti da un'altezza di 9 metri; caduta su un picchetto d'acciaio da un'altezza di un metro; bruciare in fuoco di benzina per 30 minuti; immersione in acqua per 8 ore (Ibidem). Queste misure di sicurezza aiutano a mantenere le persone e l'ambiente al sicuro nel caso in cui qualcosa vada storto, tuttavia, non garantiscono una sicurezza certa. Infatti, un contesto a rischio zero è impossibile perché non esiste uno stato naturale di rischio zero (Carpio-de Los Pinos et al., 2021). Poiché il rischio zero è fisicamente impossibile, nessuno può progettare un sistema esente da rischi. Sebbene l'obiettivo strategico sia lodevole, non fornisce alcuna guida pratica agli ingegneri su quali debbano essere i limiti di rischio accettabili (Ibidem).

Attualmente, i dati sembrano premiare il nucleare come una delle fonti energetiche più sicure. La sicurezza di una fonte energetica viene misurata attraverso tre indicatori: inquinamento atmosferico, che causa ogni anno milioni di morti premature; incidenti registrati, che comprende gli incidenti che si verificano nelle fasi estrattive e di trasporto delle materie prime energetiche, costruzione e manutenzione degli impianti e nelle fasi operative; emissioni di gas serra, che contribuiscono al riscaldamento globale e mettono a rischio la qualità della vita e la salute (Ritchie et al., 2022). La Figura 2.17 riporta il numero di morti per unità di energia elettrica prodotta, consentendo di confrontare i diversi gradi di sicurezza delle fonti energetiche selezionate.

Figura 2.17 – Numero di morti per unità di energia elettrica prodotta (TWh).



Fonte: Ritchie et al., 2022

La figura mette in evidenza un dato chiaro: i combustibili fossili⁸⁹ e le biomasse uccidono molte più persone rispetto al nucleare e alle moderne fonti rinnovabili per TWh⁹⁰ di elettricità prodotta (Ritchie et al., 2022). Il carbone è di gran lunga la fonte energetica più pericolosa. Nonostante gli ottimi risultati, la nostra percezione della sicurezza dell'energia nucleare è fortemente influenzata da due incidenti: Chernobyl in Ucraina nel 1986 e Fukushima in Giappone nel 2011. Si è trattato di eventi tragici. Tuttavia, rispetto ai milioni di morti che muoiono ogni anno a causa dei combustibili fossili, i morti dovuti a incidenti nucleari sono in confronto pochi. Sebbene sia difficile da stimare, si ipotizza un numero di morti pari a 300-500 per Chernobyl e 2.314 per Fukushima (quest'ultimo dato è stato il risultato di una revisione effettuata dal Governo giapponese nel 2020) (Ibidem).

Il disastro di Fukushima ha suggerito ancora una volta che gli incidenti nucleari gravi potrebbero essere più frequenti di quanto gli studi sulla sicurezza avessero previsto e sperato (Rose e Sweeting, 2016). Secondo i calcoli dello studio di Rose e Sweeting, la probabilità complessiva di un incidente di fusione del nocciolo nel prossimo decennio, in un mondo con circa 440 reattori attivi, è quasi del 70%. A causa dell'incertezza statistica, tuttavia, la probabilità potrebbe variare da circa il 28% a circa il 95% (Rose e Sweeting, 2016). Secondo

⁸⁹ Queste stime per i combustibili fossili rappresentano probabilmente una sottostima in quanto si basano sulle centrali elettriche europee, che hanno un buon controllo dell'inquinamento (Ritchie et al.2022).

⁹⁰ Un terawattora equivale al consumo annuale di elettricità di circa 150.000 cittadini dell'Unione Europea (Ritchie et al., 2022).

un altro studio, sulla base delle ore di funzionamento di tutti i reattori nucleari civili e del numero di fusioni che si sono verificate, gli scienziati dell'Istituto Max Planck per la Chimica di Magonza hanno calcolato che tali eventi potrebbero verificarsi una volta ogni 10-20 anni, circa 200 volte più spesso di quanto stimato in passato (Lelieveld et al., 2012). Infine, l'ultimo aspetto negativo che potrebbe inficiare l'efficienza e il contributo complessivo del nucleare, è rappresentato dalla dipendenza dell'acqua per raffreddare il reattore (Whieldon e Kuykendall, 2020). Secondo i ricercatori e gli esperti del settore, con l'aumento del riscaldamento globale e del consumo di acqua da parte dell'umanità, le centrali elettriche nucleari che si affidano all'acqua dolce per il raffreddamento potrebbero non essere in grado di funzionare al massimo delle loro capacità o potrebbero essere costrette a chiudere temporaneamente, anche se la domanda di elettricità per il raffrescamento e per altri usi aumenta. I problemi di carenza idrica, aggravati dai cambiamenti climatici, rappresentano un rischio di rendimento a breve e a lungo termine per le centrali elettriche, come quelle idroelettriche e nucleari, in tutto il mondo, rischiando inoltre di rendere più lungo e difficile il *payback* degli investimenti iniziali e influenzare negativamente la competitività della produzione elettrica (Ibidem).

2.7. La fusione nucleare

Una volta al professor Stephen Hawking fu chiesto quale problema sperasse che gli scienziati potessero risolvere prima della fine del XXI secolo. *“Vorrei che la fusione nucleare diventasse una fonte di energia pratica”*, rispose. *“Fornirà una fornitura inesauribile di energia, senza inquinamento o riscaldamento globale”* (Bliss, 2022). La fusione nucleare è una delle opzioni più promettenti per generare l'energia pulita di cui il mondo ha estremo bisogno. Gli scienziati e gli ingegneri di tutto il mondo sono chiamati ad una sfida senza precedenti per sviluppare la tecnologia e portare l'elettricità da fusione nella rete (CCFE⁹¹, n.d). Il 5 dicembre 2022 è stato raggiunto un traguardo storico che ha reso la fusione nucleare un passo più vicino alla realtà: negli Stati Uniti, durante uno degli esperimenti condotti al Lawrence Livermore National Laboratory in California con l'ausilio di 192 laser, si è ottenuto un bilancio positivo di energia di 1,10 MJ, con 2,05 MJ di input e 3,15 MJ di output (Salvalaggio, 2022). Sebbene sia un risultato storico, la strada da percorrere affinché la fusione nucleare diventi una tecnologia praticabile è lunga, con il primo reattore funzionante e collegato alla rete elettrica previsto intorno al 2050 (Bliss, 2022) (CCFE, n.d). Tuttavia, le enormi potenzialità di questa tecnologia di fornire grandi

⁹¹ Culham Center For Fusion Energy.

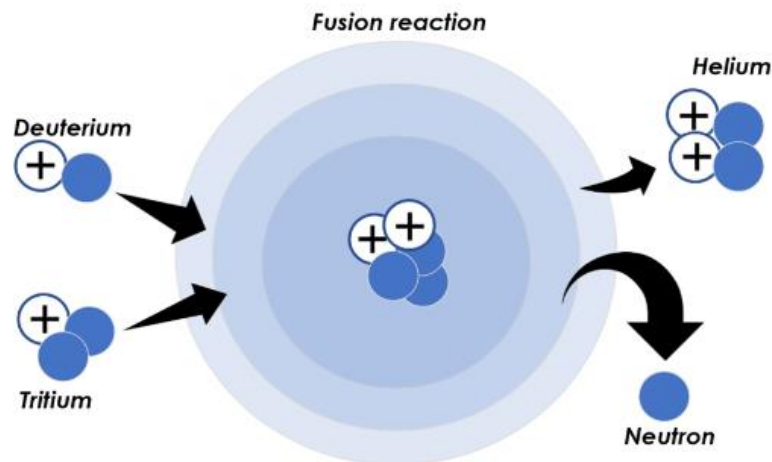
quantitativi di energia pulita e sicura, e i recenti risultati promettenti, ne rendono opportune la trattazione e l'inserimento nel confronto con le altre fonti energetiche menzionate in questo capitolo.

2.7.1. L'energia del Sole sulla Terra

Il Sole, come tutte le altre stelle, è alimentato dalla fusione nucleare (Bliss, 2022). In una reazione di fusione, due nuclei leggeri si fondono per formare un singolo nucleo più pesante. Il processo rilascia energia perché la massa totale del singolo nucleo risultante è inferiore alla massa dei due nuclei originali. La massa residua diventa energia (Chatzis e Barbarino, 2021) (DOE, n.d). L'energia che si sprigiona dalla fusione è 4 volte maggiore di quella generata dalla fissione dei nuclei (Chatzis e Barbarino, 2021). L'equazione di Einstein ($E=mc^2$), che dice in parte che la massa e l'energia possono essere convertite l'una nell'altra, spiega perché questo processo avviene. Se gli scienziati e gli ingegneri riusciranno a sfruttare l'energia della fusione, sarà una svolta per il settore energetico (DOE, n.d).

Nel processo di fusione, i nuclei che reagiscono devono collidere con forza e frequenza (Hartley et al., 1978). La reazione può avvenire solo nello stato di plasma denso, con temperature che superano i 10 milioni di gradi centigradi. Il plasma è il quarto stato della materia e presenta proprietà uniche, distinte da quelle dei solidi, dei liquidi e dei gas. È costituito da particelle cariche che si muovono liberamente e si forma a temperature elevate quando gli elettroni vengono rimossi dagli atomi neutri (IAEA, 2019). Tale plasma deve essere tenuto insieme da qualche mezzo (ad esempio da confinamento magnetico) abbastanza a lungo da rilasciare più energia di quella richiesta per innescare la fusione. La difficoltà del confinamento del plasma aumenta con la temperatura di quest'ultimo. Di conseguenza, la reazione di fusione nei reattori a fusione di prima generazione avverrà con i requisiti del plasma più bassi (Hartley et al., 1978). Infatti, sebbene la fusione possa coinvolgere molti elementi diversi, Deuterio e Trizio, due isotopi dell'idrogeno, sono gli input che alimenteranno i reattori a fusione in quanto attualmente richiedono le condizioni "più facili" da raggiungere per innescare la fusione. La Figura 2.18 offre una rappresentazione visiva della reazione.

Figura 2.18 – Input e output della reazione di fusione



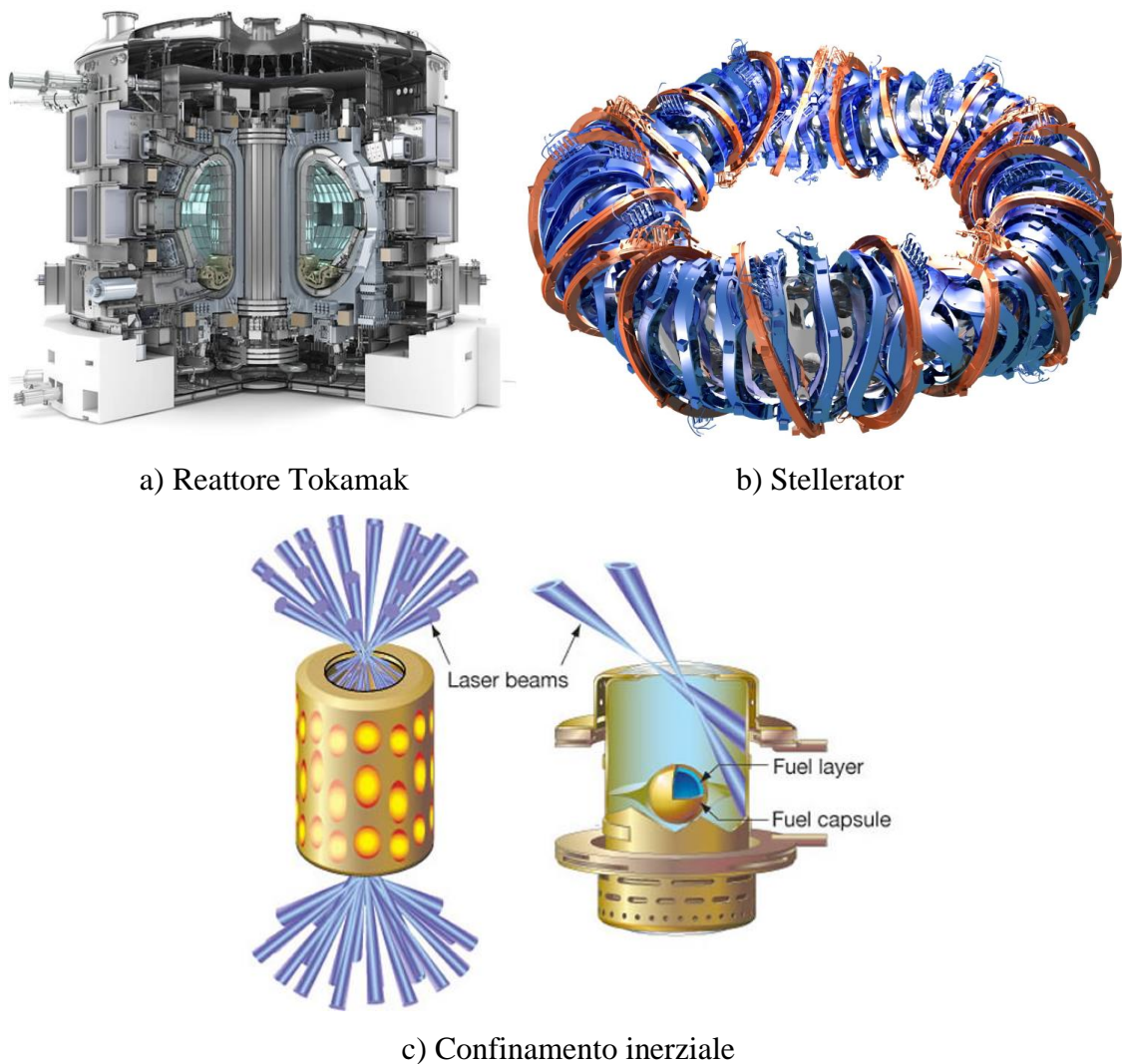
Fonte: Chatzis e Barbarino, 2021

All'interno del reattore, i nuclei di Deuterio e Trizio si scontrano e si fondono, liberando Elio, neutroni ed energia (Chatzis e Barbarino, 2021). L'energia, generando calore, consentirà di produrre elettricità come le classiche centrali termiche alimentate a combustibili fossili e le centrali a fissione nucleare. Quello che complica tale processo è ricreare sulla Terra condizioni fisiche che si manifestano nel cuore delle stelle e del nostro Sole. Infatti, mentre la massiccia forza gravitazionale del Sole induce naturalmente la fusione, in assenza di tale forza è necessaria una temperatura più elevata perché la reazione abbia luogo. Sulla Terra, sono necessarie temperature superiori a 100 milioni di gradi centigradi e di un'intensa pressione per far fondere il Deuterio e il Trizio, e di un confinamento sufficiente per trattenere il plasma e mantenere la reazione di fusione abbastanza a lungo da ottenere un guadagno netto di potenza (Ibidem).

Esistono diversi progetti di macchine a fusione. Il più comune è il "Tokamak", progettato dagli scienziati russi negli anni '50, che è tipicamente toroidale (a forma di ciambella) e dotata di potenti magneti. Il progetto con Tokamak con risultati di maggior successo è il Joint European Torus (JET) situato presso l'Atomic Energy Authority del Regno Unito a Culham (Dodgson e Gann, 2020). Dagli anni '90, il Regno Unito è stato pioniere nello sviluppo di tokamak sferici, tipicamente più piccoli delle macchine toroidali, che mirano a configurazioni compatte, più economiche e più affidabili. Lo "Stellarator" è un progetto più complicato, in cui il contenitore è attorcigliato per facilitare l'equilibrio del plasma che scorre, come ad esempio il Wendelstein 7-X in Germania. Un altro approccio alla fusione "è il confinamento inerziale", in cui il combustibile di fusione viene istantaneamente compresso da una forza enorme. Questo può essere fatto usando i laser. Ad esempio, la

National Ignition Facility statunitense utilizza il laser più potente del mondo per comprimere il combustibile da fusione all'interno di piccoli pellet (Ibidem). Quest'ultima tecnologia ha permesso di raggiungere il risultato storico del 5 dicembre 2020 precedentemente menzionato. La Figura 2.19 mostra come si presentano queste tre tecnologie.

Figura 2.19 – Principali tecnologie per la fusione nucleare.



Fonti: F4E⁹², n.d; Dodgson e Gann, 2020; Lawrence Livermore National Laboratory, n.d

Anche con investimenti massicci, ci sono ostacoli molto elevati da superare: sfide tecniche ed ingegneristiche, dalle prestazioni del combustibile alla costruzione e manutenzione dei reattori (Bliss, 2022). Solo una cooperazione mondiale consentirà di superare, auspicabilmente, tali sfide. A livello mondiale, esperti di circa 50 Paesi sono impegnati nella ricerca sulla fisica del plasma e nello sviluppo dei reattori a fusioni, con i contributi

⁹² Fusion for Energy.

economici maggiori provenienti da Unione Europea, Stati Uniti, Regno Unito, Russia, Cina, Giappone, India, Corea del Sud e Australia (Broussard, 2021) (Commissione Europea, n.d). Ad oggi, uno dei più grandi esperimenti scientifici al mondo è il programma di ricerca e fusione ITER, attualmente in costruzione a Cadarache, nel sud della Francia (Dodgson e Gann, 2020). ITER conta sette membri: UE, Giappone, Corea del Sud, Russia, Stati Uniti, Cina e India, e un totale di 35 Paesi coinvolti. Questo vasto esperimento dimostrativo internazionale, che dovrebbe diventare operativo nel 2025, dispone di un budget iniziale di 10 miliardi di dollari che può essere quadruplicato. Attualmente a ITER lavorano 3.000 persone e circa 15.000 contribuiscono a livello mondiale (Ibidem).

2.7.2. *Energia inesauribile, pulita e sicura*

La fusione nucleare presenta gli stessi vantaggi della fissione nucleare, con ulteriori vantaggi che verranno trattati nel seguente paragrafo.

La fusione nucleare può far parte del mix energetico sostenibile di domani (F4E, n.d). La fusione non emette nell'atmosfera tossine nocive, CO₂ o altri gas serra che contribuiscono al riscaldamento globale (ITER⁹³, n.d). Gli unici sottoprodotti generati sono piccole quantità di elio, un gas inerte che può essere rilasciato in modo sicuro senza danneggiare l'ambiente (CCFE, n.d). Insieme alle rinnovabili, la fusione ha il potenziale di aiutare a ridurre le emissioni di gas serra nell'atmosfera, contribuendo attivamente all'obiettivo di contenimento dell'innalzamento delle temperature entro la fine del secolo (Mathew, 2022). Dal punto di vista dell'alimentazione, la fusione nucleare gode di enormi vantaggi. Infatti, a differenza delle fonti fossili e dell'Uranio, che sono fonti non rinnovabili e finite, il combustibile delle centrali a fusione è pressoché inesauribile (CCFE, n.d). Il Deuterio può essere distillato dall'acqua marina, mentre il Trizio sarà prodotto durante la reazione di fusione quando i neutroni interagiranno con il Litio. Le riserve terrestri di Litio consentirebbero il funzionamento delle centrali a fusione per oltre 1.000 anni, mentre le riserve marine di litio soddisferebbero il fabbisogno per milioni di anni). Una sfida cruciale è come produrre e recuperare il trizio in modo affidabile in un dispositivo di fusione (ITER, n.d) (CCFE, n.d). Una tale abbondanza di combustibile riduce il rischio di tensioni geopolitiche per l'approvvigionamento di risorse energetiche e migliora, di conseguenza, la sicurezza energetica dei Paesi che usufruiranno di questa tecnologia (F4E, n.d). Inoltre, la fusione risulta molto efficiente dal punto di vista energetico (CCFE, n.d). Una reazione di fusione è circa quattro milioni di volte più energetica di una reazione chimica come la

⁹³ International Thermonuclear Experimental Reactor Organization.

combustione di carbone, petrolio o gas. Mentre una centrale a carbone da 1000 MW richiede 2,7 milioni di tonnellate di carbone l'anno, una centrale a fusione del tipo previsto per la seconda metà del secolo richiederà solo 250 chili di combustibile all'anno, metà Deuterio e metà Trizio (ITER, n.d). Solo pochi grammi di combustibile sono presenti nel plasma in ogni momento. Questo rende un reattore incredibilmente economico nel consumo di combustibile, a tal punto da stimare che il consumo annuo di combustibile riuscirebbe a stare in una piscina di medie dimensioni (Bliss, 2022) (ITER, n.d).

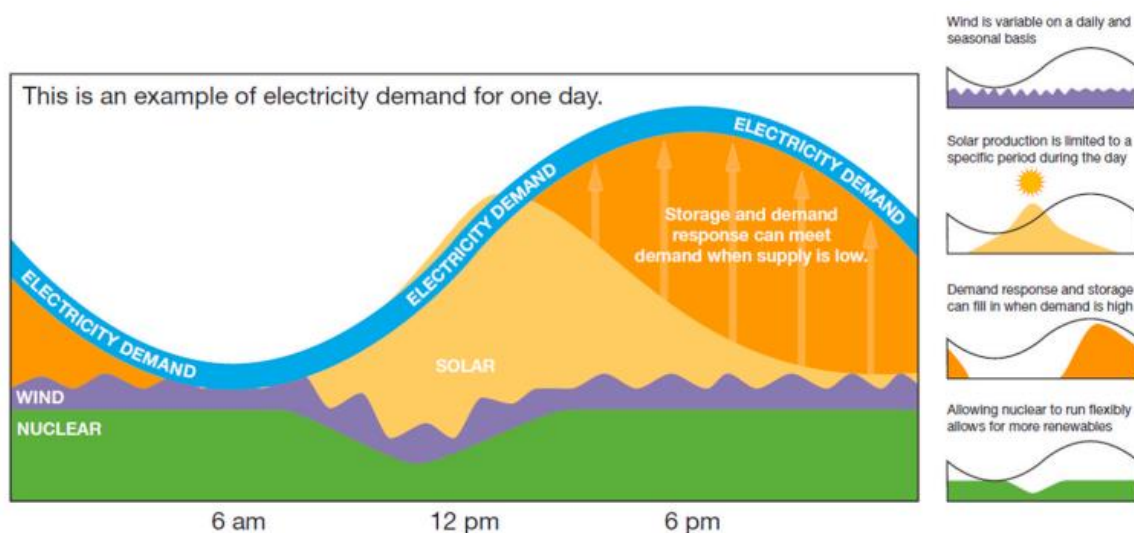
Un utilizzo così ridotto di combustibile durante il funzionamento del reattore permette di ottenere vantaggi considerevoli anche in termini di sicurezza, soprattutto quando si paragona la fusione alla fissione (ITER, n.d). Un incidente su larga scala non è possibile in un reattore a fusione. Le quantità di combustibile utilizzate nei dispositivi di fusione sono molte ridotte (circa il peso di un francobollo alla volta). Inoltre, poiché il processo di fusione è difficile da avviare e mantenere, non c'è il rischio di una reazione a catena incontrollata che potrebbe portare ad una fusione del nocciolo come avvenuto nei disastri nucleari di Chernobyl o Fukushima (CCFE, n.d). Se si verificasse un qualsiasi disturbo o malfunzionamento, il plasma si raffredderebbe in pochi secondi e la reazione si arresterebbe (ITER, n.d).

Oltre alla sicurezza della reazione di fusione, un altro vantaggio della fusione è rappresentato dai prodotti di scarto. Il principale output della fusione dell'idrogeno è l'elio, un gas inerte (Irfan, 2022). Il processo può indurre alcuni materiali del reattore a diventare radioattivi, ma la radioattività è molto più bassa e la quantità di rifiuti pericolosi è di gran lunga inferiore rispetto alle centrali nucleari convenzionali (Irfan, 2022) (CCFE, n.d). Si prevede che l'esposizione dei componenti in un reattore a fusione sia sufficientemente bassa da consentirne il riciclo o reimmissione dei materiali nel flusso circolare entro 100 anni, a seconda dei materiali utilizzati nella "prima parete" rivolta verso il plasma. Parte della ricerca mira a individuare i materiali adatti per ridurre il più possibile i tempi di decadimento (ITER, n.d) (CCFE, n.d). Dunque, l'energia da fusione nucleare si prospetta come una delle fonti di energie più sicure (Irfan, 2022).

Se la fusione diventerà una soluzione commercializzabile, rappresenterà, come il nucleare convenzionale, una fonte energetica affidabile, producendo una fornitura continua di grandi quantità di energia (CCFE, n.d). Infatti, ha il potenziale per soddisfare il carico di base (ITER, n.d). Questo è vero poiché, allo stesso modo della fissione, le centrali a fusione saranno funzionanti 24 ore su 24, 7 giorni su 7 e potranno soddisfare le fluttuazioni della domanda e fornire stabilità alle reti elettriche, in particolare quelle con un'elevata quota di

fonti rinnovabili intermittenti che altrimenti dovrebbero dipendere dai combustibili fossili (Mathew, 2022). La Figura 2.20 mostra l'andamento della domanda di energia che tipicamente si verifica in un ciclo di 24 ore. Come si evince dalla figura, l'energia nucleare può fornire una capacità di backup per la generazione variabile di energia solare ed eolica senza bisogno di combustibili fossili (Ibidem).

Figura 2.20 – Rappresentazione della domanda di energia elettrica in un ciclo di 24 ore.

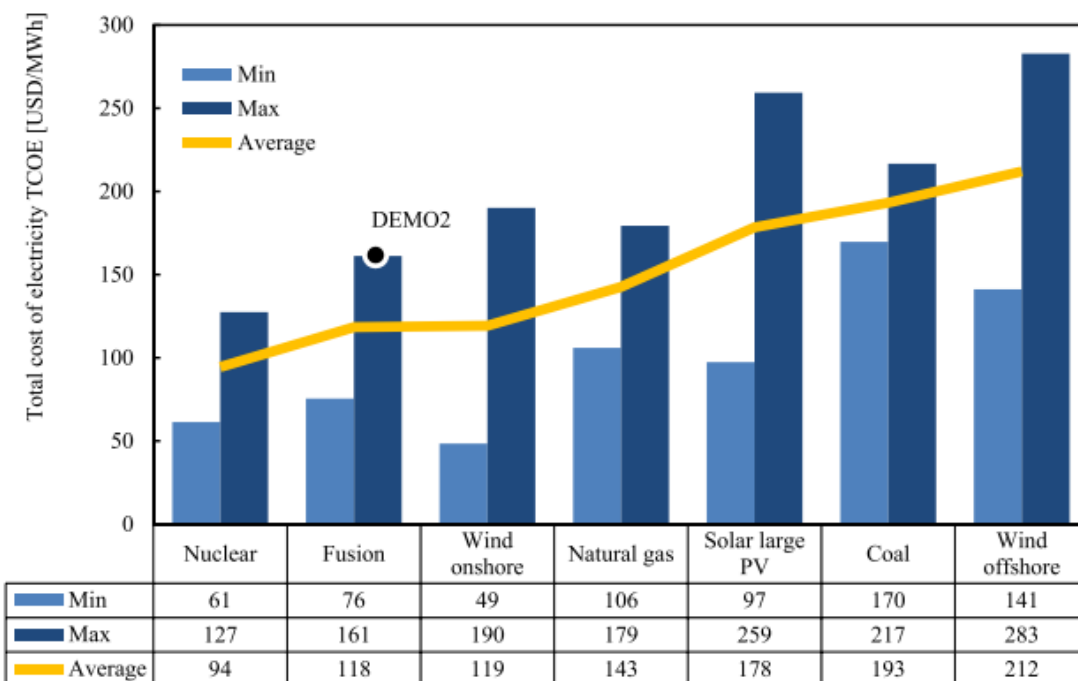
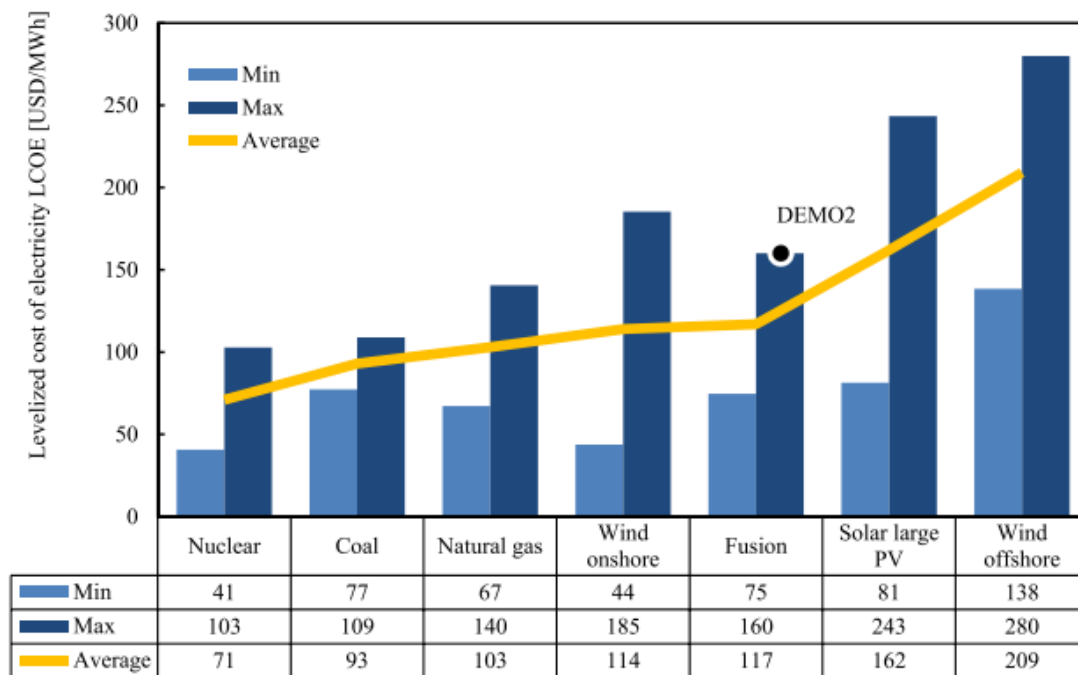


Fonte: Mathew, 2022

Infine, anche i costi finali dell'energia elettrica prodotta con fusione sembrano essere promettenti. Sebbene non sia ancora possibile estrapolare con assoluta certezza il costo medio per kWh o MWh, si suppone che, come per molte nuove tecnologie, i costi saranno più elevati all'inizio, quando la tecnologia è nuova, e gradualmente scenderanno grazie alle economie di scala (ITER, n.d). Tuttavia, lo studio di Entler et al. del 2018 ha cercato di stimare l'LCOE e il TCOE (*Total Cost of Energy*) della fusione nucleare. Per il calcolo, sono stati utilizzati i dati pubblicati dall'European Fusion Development Agreement nel 2005, ricalcolati sul livello dei prezzi del 2015 e utilizzati i dati della centrale a fusione DEMO2. La ragione per cui lo studio stima anche il TCOE risiede nel diverso impatto sull'ambiente delle differenti fonti energetiche; è dunque necessario conteggiare i costi esterni sostenuti in relazione alle attività di queste fonti. Il TCOE è il risultato della somma tra LCOE e costi esterni. La figura 2.21 riporta l'LCOE⁹⁴ e TCOE delle fonti energetiche selezionate.

⁹⁴ L'LCOE delle diverse fonti di questo studio sono stati calcolati sulla base di dati OCSE del 2015. Questi differiranno dai dati di Lazard del 2021 presentati durante la trattazione, che risultano più aggiornati e corretti.

Figura 2.21 – LCOE e TCOE di fonti energetiche selezionate. Dati espressi in \$/MWh.



Fonte: Entler et al., 2018

Analizzando i grafici, il primo mostra un LCOE della fusione mediamente alto, soprattutto se paragonato ai dati aggiornati al 2021 (pag. 80). Infatti, il dato si attesta sul livello dell’LCOE delle fonti fossili e nettamente superiore a quello delle rinnovabili e del nucleare

L’obiettivo con cui vengono presentati i grafici della Figura 2.21 è di dare una misura approssimativa dei costi della fusione nucleare.

tradizionale. Tenendo conto dei costi esterni oltre all'LCOE, il TCOE presentato nel secondo grafico restituisce una misura di competitività della fusione nucleare molto diversa. Dal punto di vista dell'attuale percezione del bisogno di energia sostenibile, il TCOE dovrebbe essere il criterio decisivo per la valutazione della redditività delle singole fonti energetiche. Quando si tiene conto dell'impatto ambientale in caso di internalizzazione dei costi esterni, le centrali a fusione risultano economicamente competitive (Entler et al., 2018).

2.7.3. Incertezze nello sviluppo ed elevati costi

Se mai verranno dimostrate le condizioni per una reazione termonucleare in grado di produrre energia in maniera commercializzabile, dovranno essere superati difficili problemi ingegneristici ed economici. Infatti, gli ostacoli a qualsiasi applicazione pratica dell'energia da fusione sono l'entità del costo del capitale dell'impianto e la durata limitata del contenitore del reattore (Parkins, 1978). Il problema della vita operativa limitata del contenitore del reattore è insito nell'uso di reazioni termonucleari, come quella tra Deuterio e Trizio, che rilasciano neutroni energetici e dannosi e per la struttura di contenimento (Ibidem). Infatti, il carico di calore e di neutroni sarà talmente elevato che la vita attesa di specifici componenti del reattore (4,5 – 10,5 anni stimati) sarà molto più breve di quella dell'impianto (40 anni) (Entler et al., 2018). Il costo di sostituzione dei componenti danneggiati inciderà sensibilmente sui costi totali dell'impianto e con il rischio di inficiare la competitività economica dell'energia prodotta (Ibidem).

L'altro svantaggio è costituito dai costi, elevati e spesso incerti: il National Ignition Facility a Livermore, dove si è svolto l'esperimento del 5 dicembre 2022, è costato 3,5 miliardi di dollari (Fountain, 2022). Il prezzo di ITER, ad oggi, è di oltre 20 miliardi di dollari, e potrebbe salire ancora. Non è chiaro se il mondo potrebbe permettersi le centrali a fusione derivanti da questi progetti. Nella migliore delle ipotesi, solo i Paesi economicamente più ricchi potranno accedere a questa tecnologia, con il rischio che aumenti il divario tra Paesi sviluppati e non (Ibidem).

Infine, l'ultimo svantaggio è il tempo necessario a sviluppare la fusione nucleare. Per limitare il riscaldamento a 1,5 gradi centigradi, è cruciale raggiungere lo zero netto entro il 2050 (IEA, 2021) Dunque, anche se le centrali a fusione diventassero una realtà, probabilmente non arriverebbero in tempo per aiutare a contrastare gli effetti del cambiamento climatico che si stanno aggravando a breve termine. Secondo molti scienziati e politici, è molto meglio concentrarsi sulle tecnologie di energia rinnovabile attualmente

disponibili, come l'energia solare ed eolica, per contribuire al raggiungimento di questi obiettivi prefissati (Fountain, 2022).

2.8. *Un passo in più*

Come anticipato a inizio capitolo, la valutazione complessiva di una fonte energetica richiede di soppesare i *trade-off* che presenta. Non deve essere solo pulita, ma deve anche essere affidabile, accessibile e conveniente (Pitt 2018). Stabilire il mix energetico ideale al fine di soddisfare le tre sfere del trilemma energetico non rappresenta una sfida facile per i decisori politici, i quali devono disegnare politiche energetiche adeguate alle esigenze nazionali ed internazionali (WEC, 2019). Il capitolo 2 ha messo in evidenza vantaggi e svantaggi, pregi e difetti delle principali fonti energetiche. Solo una comprensione a livello socio-politico delle caratteristiche delle differenti fonti e tecnologie energetiche e, un'adeguata comunicazione delle stesse, permetterà di costruire un mix energetico efficace e pubblicamente accettato (Pitt, 2018).

Il mix energetico futuro ideale per un Paese e per il pianeta si baserebbe su una varietà di metodi di generazione, anziché su un'unica fonte (ITER, n.d). In questo scenario, la fusione nucleare si presenta come un'opzione dalle enormi potenzialità. Infatti, come nuova fonte di energia elettrica di base priva di carbonio e che non produce scorie radioattive a lunga vita, la fusione potrebbe dare un contributo positivo alle sfide della disponibilità delle risorse, della riduzione delle emissioni di carbonio e dei problemi di sicurezza e smaltimento delle scorie di fissione (Ibidem)

Nonostante i chiari vantaggi connessi all'utilizzo futuro della fusione nucleare, inevitabilmente, la sola menzione della parola "nucleare", dopo disastri come quelli di Chernobyl e Fukushima, incute timore a molti consumatori energetici, pur essendo la fusione virtualmente priva di rischi rispetto alla fissione (Bliss, 2020).

Obiettivo dei prossimi capitoli e della trattazione nel suo complesso è di studiare, mediante l'analisi di un caso studio effettuato con il metodo per l'elicitazione delle preferenze del consumatore di scelta discreta (*Discrete Choice Experiment*), il grado di accettazione della fusione nucleare da parte dei consumatori energetici italiani, e di individuare gli attributi che ne accrescono o ne diminuiscono tale accettabilità.

Capitolo 3

3. *Esplorazione della letteratura scientifica esistente relativa a DCE in ambito energetico e sulla fusione nucleare*

Come anticipato in chiusura nel capitolo precedente, l'esperimento di scelta discreta⁹⁵ (DCE) che verrà presentato nel corso di questa trattazione si concentrerà sulla potenziale implementazione dell'energia nucleare da fusione in Italia, ipotizzando che sia una tecnologia già disponibile e praticabile oggi. Il modello di scelta discreta terrà conto congiuntamente delle decisioni adottate dai rispondenti in un contesto di scelta tra scenari tra loro alternativi e dell'eterogeneità delle preferenze, consentendo di stimare il potenziale effetto degli attributi e dei loro rispettivi livelli nella scelta del consumatore. Al fine di mettere in piedi l'analisi proposta, è stato inizialmente effettuato uno studio della letteratura scientifica esistente in merito ad esperimenti di scelta discreta in ambito energetico, sul nucleare tradizionale (fissione) e da fusione (focus della trattazione). Tale ricerca preliminare è stata necessaria al fine di comprendere in maniera ottimale l'ambito di ricerca, i risultati già ottenuti e relative interpretazioni e le aree non ancora oggetto di studio. Infine, con tali conoscenze pregresse è stato possibile definire gli attributi ed i livelli e costruire il questionario somministrato durante l'esperimento.

3.1. *Risultati della literature review*

La ricerca iniziale si è focalizzata sull'analisi delle pubblicazioni disponibili sul database Scopus di Elsevier NV effettuata a marzo 2022. La ricerca è stata effettuata mediante l'utilizzo delle parole chiavi "Nuclear fusion", "Energy", "Choice Experiment" e "Discrete Choice Experiment". Le pubblicazioni, che sono state oggetto di studio per disegnare l'esperimento, non sono antecedenti al 2012, con gli studi più recenti pubblicati nel 2022. Il fatto che le pubblicazioni individuate e analizzate siano relativamente attuali è dovuto, da una parte, alla necessità di utilizzare dati aggiornati su tecnologie in continua evoluzione e miglioramento, dall'altra, alla diffusione solo recente di questo metodo di elicitazione delle preferenze del consumatore. Infatti, sebbene questa tecnica sia stata sviluppata ed introdotta da Louviere e Woodworth nel 1983 nell'ambito del marketing, solo a partire dalla metà degli anni 2000 ha cominciato ad acquisire sempre più popolarità, sostituendo gradualmente

⁹⁵ Gli esperimenti di scelta discreta (DCE o *Discrete Choice Experiment*) sono utilizzati per capire su cosa le persone basano le loro decisioni e scelte. Appartengono ai metodi di elicitazione delle preferenze del consumatore tramite "preferenze dichiarate", che permettono di determinare il peso degli attributi nel processo di scelta dell'individuo (Alriksson e Öberg, 2008).

l'utilizzo del metodo della valutazione contingente (Mahieu et al., 2014) (Wang et al., 2021).

La tabella 3.1 mostra le pubblicazioni individuate ed utilizzate ai fini dell'elaborazione dell'esperimento e per inquadrare meglio l'ambito di ricerca. La tabella riporta il titolo dello studio, i relativi autori, l'anno di pubblicazione, la fonte e un breve riassunto del contenuto di ciascuna pubblicazione.

Tabella 3.1 – Elenco delle fonti scientifiche individuate e implementate nella trattazione e disegno del questionario somministrato durante l'esperimento.

N.	Titolo	Autori	Anno	Fonte	Riassunto
1	Fossil energy versus nuclear, wind, solar and agricultural biomass: Insights from an Italian national survey.	Cicia, G., Cembalo, L., Del Giudice, T., Palladino, A.	2012	Energy Policy, Volume 42	In Italia c'è stato considerevole dibattito politico riguardo alla nuova politica energetica, che è specificamente progettata per contribuire al mitigazione del cambiamento climatico. Se da un lato c'è un rinnovato interesse per il nucleare, dall'altro c'è un acceso dibattito riguardo ai parchi eolici che si sono diffusi rapidamente modificando drammaticamente l'integrità del paesaggio delle aree rurali. Le persone sono preoccupate rispetto al cambiamento del paesaggio e alla riduzione nella produzione agricola.
2	Spatial Effects in Willingness to Pay for Avoiding Nuclear Risks.	Schneider, Y., Zewifel, P.	2013	Swiss Journal of Economics and Statistics, Volume 149	La gestione dei rischi associati all'energia nucleare è una questione di fondamentale rilevanza. Il paper indaga gli effetti che la distanza di un individuo rispetto all'impianto gioca nella disponibilità a pagare un'assicurazione maggiore contro incidenti nucleari e la WTP della gestione delle scorie radioattive e del loro smaltimento.
3	Consumers' willingness to pay for renewable and nuclear energy: A comparative analysis between the US and Japan.	Murakami, K., Ida, T., Tanaka, M., Friedman, L.	2015	Energy Economics, Volume 50	Lo studio analizza la WTP dei consumatori per l'energia derivante da nucleare e dalle rinnovabili come due alternative alle fonti fossili per la riduzione delle emissioni clima-alteranti. Viene condotto un <i>choice experiment</i> in quattro stati degli Stati Uniti e in Giappone dopo l'incidente di Fukushima.
4	The importance of regret minimization in the choice for renewable energy programmes: Evidence from a discrete choice experiment.	Boeri, M., Longo, A.	2017	Energy Economics, Volume 63	Lo studio fornisce un tentativo metodologicamente rigoroso di sbrogliare l'impatto di diversi fattori, ossia eterogeneità non osservata e attitudini informative e ambientali, sull'inclinazione degli individui a mostrare o un comportamento massimizzante dell'utilità o minimizzante il rimorso in un DCE per programmi di energie rinnovabili descritto da diversi attributi: emissioni di gas serra, blackout, impiego nel settore energetico e bolletta dell'elettricità.
5	A socio-technical analysis of consumer preferences about energy systems applying a simulation-based approach: A case study of the Tokyo area.	Nakai, M., Okubo, T., Kikuchi, Y.	2018	Energy Research & Social Science, Volume 46	Attraverso un questionario contenete un <i>choice experiment</i> , sono state analizzate le preferenze riguardanti l'approvvigionamento elettrico a Tokyo. Emerge come i consumatori tendano ad acquistare elettricità da grandi fornitori che offrono una componente di rinnovabili all'interno del mix energetico proposto, permettendo di avere forniture stabili e prezzi contenuti con poca volatilità. Inoltre, tendono a evitare l'energia nucleare, e mostrano una WTP positiva per fornitori regionali solo dopo dei suggerimenti sui possibili benefici economici a livello regionale.

Continua

6	Public preferences for the Swiss electricity system after the nuclear phase-out: A choice experiment.	Plum, C., Olschewski, R., Jobin, M., van Vliet, O.	2019	Energy Policy, Volume 130	È stata condotta un'indagine rappresentativa nel catone tedesco della Svizzera al fine di elicitarle le preferenze della popolazione in merito all'energia solare, eolica o derivante da gas naturale sotto diverse condizioni istituzionali e specifiche del sito dopo l'abbandono del nucleare.
7	What Do Potential Residents Really Want When Hosting a Nuclear Power Plant? An Empirical Study of Economic Incentives in South Korea.	Huh, S.Y., Woo, J., Lee, C.Y.	2019	Energies, Volume 12(7)	Per aumentare il grado di accettazione di nuovi impianti nucleari da parte delle comunità locali, alcuni paesi offrono incentivi economici/compensazioni. Lo studio analizza le potenziali preferenze dei residenti per incentivi economici forniti durante la costruzione e operazione di nuovi impianti nucleari in Corea del Sud.
8	The South Korean public's evaluation of the mix of power generation sources: A choice experiment study.	Kim, H.J., Lim, S.Y., Yoo, S.H.	2020	Energy & Environment, Volume 31(7)	Il governo sudcoreano sta seguendo una transizione energetica, la quale necessita di una riduzione dell'energia nucleare e del carbone, nonché un maggior investimento nell'energia rinnovabile. Questo studio mira a valutare le preferenze pubbliche sudcoreane per un mix energetico con diverse fonti.
9	Consumers' heterogeneous preferences toward the renewable portfolio standard policy: An evaluation of Korea's energy transition policy.	Lee, J., Moon, H., Lee, J.	2021	Energy & Environment, Volume 32(4)	Le basse tariffe energetiche in Korea paragonate con quelle di altri paesi sviluppati rende l'aumento della quota di rinnovabili più sfidante in quanto i suoi costi sono più elevati rispetto a quelli generati da fonti tradizionali quali l'energia termica e nucleare. Un incremento nelle tariffe è richiesto per consentire lo sviluppo delle rinnovabili e accelerare la transizione energetica. È perciò necessario determinare l'accettabilità a livello pubblico di nuove politiche energetiche implementate dal governo coreano per aumentare la quota di rinnovabili.
10	Predicting attitudes towards fusion energy in Europe: Results of a cross-national public survey in Austria, Finland, Spain and the UK.	Jones, C.R., Oltra, C., Prades, A.	2021	Energy Research & Social Science, Volume 75	L'obiettivo dello studio è stato quello di esaminare la natura e gli antecedenti degli atteggiamenti del pubblico nei confronti della fusione in Europa. I dati sono stati raccolti utilizzando un questionario online di tipo informativo a scelta distribuito a diversi campioni provenienti da Finlandia (n = 849), Austria (n = 830), Spagna (n = 872) e Regno Unito (n = 849).
11	Greater acceptability, lower compensations required? The impact of perceived net benefits on willingness to accept nuclear energy projects.	Contu, D., Elshareif, E.E.	2021	International Journal of Energy Sector Management, Volume 16(2)	Lo studio mira a stimare la WTA progetti ipotetici di energia nucleare e l'impatto dei benefici netti percepiti in tre diversi paesi: Italia, un paese senza centrali operative; Gran Bretagna, un paese con centrali operative e gli Emirati Arabi Uniti, che vuole includere il nucleare nel proprio portafoglio energetico. Queste valutazioni possono sostenere analisi costi-benefici permettendo ai policymaker di tenere conto di ulteriori benefici e costi che altrimenti verrebbero tralasciati.
12	"I take the green one": The choice of regional green electricity contracts in the light of regional and environmental identity.	Fait, L., Groh, E.D., Wetzels, H.	2022	Energy Policy, Volume 163	Si indaga se la scelta di un contratto energetico sia guidata da euristiche della decisione. Basandosi su uno <i>stated choice experiment</i> sui contratti energetici, emerge una WTP per elettricità verde e regionale che è causalmente influenzata dall'identità ambientale e regionale.
13	Testing for saliency-led choice behavior in discrete choice modeling: An application in the context of preferences towards nuclear energy in Italy	Contu, D., Strazzera, E.	2022	Journal of Choice Modelling, Volume 44	Lo studio presenta un'applicazione innovativa nel contesto delle preferenze nei confronti dell'energia nucleare, con dati ottenuti da un sondaggio online condotto in Italia su scala nazionale. I risultati mostrano che la maggior parte della variazione nei dati di scelta è effettivamente dovuta all'eterogeneità del processo decisionale, dove l'euristica della salienza gioca un ruolo importante.

Come si evince dalla tabella, la ricerca della letteratura esistente ha restituito diverse pubblicazioni inerenti esperimenti di scelta discreta in ambito energetico, focalizzati sulla scelta del mix energetico nazionale e spesso sull'accettabilità sociale del nucleare tradizionale e/o sul ruolo degli incentivi per controbilanciarne l'immagine spesso negativa. Ciò che emerso, tuttavia, è la completa assenza di studi basati su esperimenti di scelta discreta che tenessero in considerazione tale fonte energetica. Per un'ulteriore prova di certezza dell'assenza di studi scientifici di tale tipo sulla fusione nucleare, l'8 gennaio 2023 è stata svolta un'ulteriore ricerca sulla piattaforma Scopus che, ancora una volta, non ha prodotto risultati. L'unica pubblicazione individuata utile a costruire le aspettative sui potenziali risultati che sarebbero stati ottenuti nell'esperimento è stato lo studio di Jones et al. del 2021. I possibili elementi di interesse contenuti nelle pubblicazioni soprammenzionate saranno oggetto del prossimo paragrafo.

3.2. Elementi di interesse dalla literature review

Prima di trattare le pubblicazioni con esperimenti di scelta discreta relativi all'ambito energetico, dove l'energia da fusione non è un'opzione inclusa e trattata, risulta interessante incominciare dallo studio di Jones et al. del 2021 relativo all'attitudine e percezione della fusione nucleare in uno studio transnazionale, con i risultati di Finlandia, Austria, Spagna e Regno Unito.

Nelle democrazie occidentali, è noto che i cittadini esercitano un'influenza sulle decisioni politiche e di localizzazione relative a tecnologie e progetti energetici (Peterson et al., 2015). È quindi importante comprendere le percezioni del pubblico sulle tecnologie energetiche sotto analisi. Come riscontrato da Jones et al., la ricerca scientifica sugli atteggiamenti del pubblico nei confronti della fusione è attualmente molto limitata, con pochi articoli scientifici, relazioni ed atti di conferenze pubblicati fino ad oggi. Le ricerche ad oggi completate tendono a mettere in evidenza i livelli relativamente bassi di consapevolezza e comprensione della fusione nucleare da parte del pubblico, ma mettono in evidenza anche i livelli generalmente alti di sostegno al concetto, almeno in linea di principio. Infatti, contrariamente alla fissione nucleare, la fusione viene generalmente presentata e reputata come una fonte di energia sicura, pulita e illimitata, anche se sono state espresse delle riserve sui costi della ricerca, sulla fattibilità tecnologica e sui tempi di dimostrazione commerciale e di impiego (punti a sfavore già menzionati a fine Capitolo 2). Oltre a questo, è interessante riportare un'altra condizione alla base del sostegno pubblico alla fusione: una ricerca qualitativa condotta da Prades et al. nel 2009 evidenzia come la percezione della fusione

nucleare da parte dei non addetti ai lavori sono tendenzialmente positive laddove questa non influenzi o tolga risorse allo sviluppo di energie rinnovabili. Lo studio di Jones et al., ha anche mostrato che quando ai partecipanti sono state presentate informazioni da parte di scienziati della fusione, tendevano ad adottare una posizione più ambivalente nei confronti della tecnologia. Ciò suggerirebbe che l'esposizione alle informazioni di natura più tecnica della fusione tenda a placare parte dell'entusiasmo generale e meno informato per la tecnologia.

Lo studio riporta anche i risultati di una ricerca di Horlick-Jones et al. del 2012, che analizza l'effetto dell'inquadramento (*frame*) che la terminologia associata alla fusione può avere sulla percezione della tecnologia. Ad esempio, viene illustrato l'effetto stigmatizzante che l'etichetta "nucleare" tende a esercitare sulla percezione della tecnologia a causa delle immagini negative, evocate da disastri nucleari del passato e relativi rischi, che vengono associate al termine.

Rispetto a quanto riscontrato dallo studio, i risultati concordano con quelli di ricerche, indagini e sondaggi precedenti che confermano che gli atteggiamenti verso la fusione in Europa sono generalmente favorevoli. Questo è il caso in tutti i Paesi studiati (Finlandia, Austria, Spagna e Regno Unito). Anche in Austria, il Paese risultato meno favorevole alla tecnologia, gli atteggiamenti erano in generale ambivalenti e non negativi. Tuttavia, se all'inquadramento comparativo di fusione e fissione i finlandesi (i più aperti alla fusione) percepivano la fusione come la fissione, ma migliore in termini di sicurezza e riduzione delle scorie radioattive, gli austriaci avevano una percezione più simile a: "la fusione è una tecnologia nucleare pericolosa, come la fissione". Complessivamente, dunque, lo studio di Jones et al. e quelli di altri autori forniscono un'importante prova della necessità di adattare gli sforzi di comunicazione pubblica al contesto di introduzione prevista, dunque, con la consapevolezza di quale sia la disponibilità ad accettare (*willingness to accept* o WTA) tale politica da parte degli individui.

Se lo studio di Jones et al. evidenzia una percezione tendenzialmente favorevole della fusione, lo stesso non si può dire per la fissione nucleare, dove le pubblicazioni in merito si presentano in numero decisamente più elevato. Dato che la presente trattazione si focalizza sul contesto italiano, appare opportuno partire dallo studio condotto da Cicia et al. nel 2012. Questo studio descrive i risultati di un *Latent Class Choice Experiment*⁹⁶ effettuato per

⁹⁶ La teoria alla base del *Latent Class Model* (Modello a classi latenti) prevede che il comportamento e la scelta individuale dipendano da attributi osservabili e da un'eterogeneità latente che varia con fattori non osservati dall'analista. Si ipotizza quindi che gli individui siano implicitamente suddivisi in un insieme di

quantificare le preferenze delle famiglie italiane nei confronti delle diverse fonti energetiche che potrebbero sostituire le più inquinanti fonti fossili. I risultati mostrano che le famiglie italiane possono essere suddivise in tre segmenti con preferenze omogenee. Il primo segmento (35% della popolazione) mostra una forte preferenza per l'energia eolica e solare e non ama le biomasse e il nucleare (fissione). Il secondo segmento (33%) mostra una moderata preferenza per l'energia solare ed eolica e, come per il primo segmento, non ama le biomasse e il nucleare. Il terzo (32%) mostra una forte preferenza per l'energia verde (solare, eolico e biomassa) ed è molto contrario al nucleare. Dunque, come si può cogliere dai dati, la probabilità di un intervistato di appartenere a uno dei segmenti è poco più del 30% in ciascuno dei tre casi. Uno studio approfondito dei dati fa notare che la percezione del nucleare è negativa, anche se con un'intensità diversa in tre segmenti. In altre parole, il modello dello studio suggerisce che in Italia non c'è un segmento statisticamente ampio di consumatori che apprezza l'energia nucleare, ma questo non significa che non sarebbero disposti ad acquistarla se fosse offerta ad un prezzo inferiore a quello dell'energia fossile. Infatti, se nel 2012 la bolletta bimestrale media era pari a €75 per famiglia, i consumatori della classe 1 sarebbero stati disposti a prendere in considerazione l'acquisto di elettricità generata dal nucleare solo se avesse consentito un risparmio sulla bolletta elettrica bimestrale di almeno €33,38 (Cicia et al., 2012).

Sempre in un altro studio, condotto da Contu e Elshareif pubblicato nel 2021, che mirava a stimare la disponibilità ad accettare ipotetici progetti di energia nucleare e l'impatto dei benefici netti percepiti in un confronto tra Italia, Regno Unito ed Emirati Arabi Uniti, gli intervistati italiani sono risultati i meno favorevoli. Infatti, a livello aggregato, i rispondenti italiani sembrano avere una maggiore percezione dei rischi. Ad esempio, il 62% ha indicato rischi per l'ambiente, contro il 22% del Regno Unito e il 21% degli Emirati Arabi. Per Regno Unito e ed Emirati Arabi, la preoccupazione minore è legata al rischio di incidenti catastrofici (rispettivamente 16% e 19% dei rispondenti hanno lo percepiscono come altamente probabile), mentre per il caso dell'Italia è significativamente più alta, con il 52% (come si evince dalla Tabella 3.3).

classi Q, ma che l'analista non sappia quale classe contenga un particolare individuo, sia essa nota o meno (Greene e Hensher, 2003).

Tabella 3.2 – Opinioni e preferenze verso diverse fonti di energia (% dichiarata).

	Italy		The UK		The UAE	
	Nothing/a little	Some/a lot	Nothing/a little	Some/a lot	Nothing/a little	Some/a lot
Solar/photovoltaic	4	95	15	68	10	73
Wind	8	89	21	65	18	64
Fossil fuels ^a	60	34	46	34	20	53
Nuclear	69	26	34	48	25	50
Sample size	1,198		887		1,961	

Notes: ^aAverage of oil, gas and coal; question: in your opinion, to what extent should (Italy/the UK/the UAE) invest on[. . .]? Residual shares, in each row, belong to the option “I do not know”

Fonte: Contu e Elshareif, 2021

Tabella 3.3 – Benefici e rischi percepiti (%) per caso.

	Italy ^a	The UK ^a	The UAE ^b
<i>Perceived benefits:</i>			
Less energy imports	34	32	/
Less reliance on fossil fuels	30	32	16
More convenient energy prices	26	15	15
Economic growth	20	11	16
Atmospheric emissions' reduction	20	21	9
Less unemployment	18	8	/
Technology innovation	/	/	19
<i>Perceived risks:</i>			
Nuclear waste-related risks	62	20	26
Risks for the environment	62	22	21
Risks for human health	60	20	24
Risk of catastrophic accidents	52	16	19
Terrorist attacks	40	20	20
Public investments in Italy	65	/	/
Use of nuclear for military purposes	19	/	/
Share of respondents with positive NBc	53	43	39
Sample size	1,198	887	1,961

Notes: ^aVery/extremely likely % reported; ^bvery likely % reported; ^cobtained by means of factor analysis

Fonte: Contu e Elshareif, 2021

Oltre a tali risultati, lo studio trova anche una sostanziale richiesta di compensazioni nel caso Italia, in linea con l'evidenza di un'opinione pubblica negativa nei confronti dei progetti di energia nucleare. Pertanto, coerentemente con gli studi di Jones et al., alla luce di tali percezioni timorose verso tale fonte energetica, nell'annunciare e aggiornare il pubblico sugli sviluppi dell'energia nucleare, i benefici ambientali, pubblici e privati associati a tali progetti devono essere chiaramente evidenziati (Contu e Elshareif, 2021) (Jones et al., 2021).

Oltre che per esplorare e carpire la percezione (spesso diversa da Paese a Paese) che le persone hanno della fusione nucleare, ma soprattutto della fissione nucleare, l'analisi delle pubblicazioni menzionate a inizio capitolo sono risultate di grande importanza per la scelta degli attributi e relativi livelli da proporre nell'esperimento di scelta discreta, che verrà discusso nel quarto capitolo. La Tabella 3.4 riporta gli attributi e livelli che sono stati implementati nella costruzione dei DCE attuati.

Tabella 3.4 – Attributi e livelli implementati nei DCE presenti nella letteratura scientifica presentata nella Tabella 3.1.

N. ⁹⁷	Titolo	Autori	Attributi	Livelli
2	Spatial Effects in Willingness to Pay for Avoiding Nuclear Risks.	Schneider, Y., Zewifel, P.	Prezzo	0; 10; 30; 60 (aumento %)
			Interruzioni di corrente	2; 14 (#)
			Rifiuti radioattivi	Problema irrisolto; No problema irrisolto
			Danno	0,1; 10; 100; 200 (miliardi di CHF)
			Copertura assicurativa	1; 20; 50; 100 (%)
3	Consumers' willingness to pay for renewable and nuclear energy: A comparative analysis between the US and Japan.	Murakami, K., Ida, T., Tanaka, M., Friedman, L.	Bolletta mensile elettricità	\$90; \$100; \$110; \$120 (per Stati Uniti) ¥7.000; ¥8.000; ¥9.000; ¥10.000 (per Giappone)
			Emissioni (NO _x , SO ₂ , CO ₂)	Nessuna riduzione; -20; -40; -60 (%)
			Mix energetico	(% rimanente)
			- Fonti fossili	0; 10; 20; 30 (%)
- Nucleare	0; 10; 20; 30 (%)			
- Rinnovabili	(10% fisso)			
- Idroelettrico				
4	The importance of regret minimization in the choice for renewable energy programmes: Evidence from a discrete choice experiment.	Boeri, M., Longo, A.	Riduzione annua di GHG dovuta ad aumento delle rinnovabili	1; 2; 3 (%)
			Durata annua interruzioni di corrente	30; 60; 120 (minuti)
			Variazione numero addetti nel settore energetico	+1.000; -1.000 (addetti)
			Aumento mensile bollette elettricità	6; 16; 25; 38 (£ aggiuntivi)
5	A socio-technical analysis of consumer preferences about energy systems applying a simulation-based approach: A case study of the Tokyo area.	Nakai, M., Okubo, T., Kikuchi, Y.	Fornitore energetico	Fornitore di nota riconoscibilità; Fornitore regionale; Fornitore nazionale; Fornitore estero
			Mix energetico	Mix 1 (Fonti fossili 100%); Mix 2 (Fonti fossili 80%, nucleare 20%); Mix 3 (Fonti fossili 50%, rinnovabili 30%, nucleare 20%); Mix 4 (Fonti fossili 80%, rinnovabili 20%)
			Bolletta elettrica mensile	19; 20; 21; 22 (¥/kWh)
			Stabilità della fornitura elettrica	Invariato; Più instabile; Possibili blackout causati dal maltempo
			Volatilità del prezzo	Nulla; ±100; ±300; ±500 (¥)

⁹⁷ Segue la numerazione della Tabella 3.1.

Continua

6	Public preferences for the Swiss electricity system after the nuclear phase-out: A choice experiment.	Plum, C., Olschewski, R., Jobin, M., van Vliet, O.	Fonte energetica	Solare; Eolico; Gas naturale
			Localizzazione della produzione elettrica	Svizzera; Paesi confinanti; Paesi distanti
			Gestione dell'impianto	Società nazionale; Società estera
			Impatto paesaggistico	Impatto contenuto; Impatto elevato
			Aumento mensile bollette elettricità	10; 15; 20 (CHF)
7	What Do Potential Residents Really Want When Hosting a Nuclear Power Plant? An Empirical Study of Economic Incentives in South Korea.	Huh, S.Y., Woo, J., Lee, C.Y.	Riduzione costo elettricità	Nulla; 30; 60; 90 (%)
			Costruzione nuove strutture	Nessuna; Struttura educativa; Struttura ospedaliera; Struttura multiculturale e sportiva
			Creazione posti di lavoro	1.000; 5.000 (nuovi posti di lavoro)
			Partecipazione locale	Partecipazione limitata; Partecipazione elevata
			Installazione pannelli solari	No; Sì (con costi di installazioni pienamente coperti)
			Distanza dalla centrale nucleare	5; 15; 25; 35 (Km)
8	The South Korean public's evaluation of the mix of power generation sources: A choice experiment study.	Kim, H.J., Lim, S.Y., Yoo, S.H.	Nucleare	10; 25; 30,3*; 50 (%)
			Carbone	10; 25; 45,4*; 50 (%)
			Gas naturale	10; 16,9*; 25; 50 (%)
			Rinnovabili	3; 6,2*; 10; 20 (%) (* indica lo status quo)
			Prezzo	0; 3.000; 7.000; 13.000; 20.000 (₩)
9	Consumers' heterogeneous preferences toward the renewable portfolio standard policy: An evaluation of Korea's energy transition policy.	Lee, J., Moon, H., Lee, J.	Incremento costo elettricità	2; 6; 10 (aumento %)
			Riduzione emissioni GHG	3; 5; 7 (riduzione % annua)
			Posti di lavoro	10.000; 20.000; 30.000 (assunzioni annue)
			Aumento annuo interruzioni di corrente	10; 30; 50 (minuti aggiuntivi)
			Deforestazione	530; 660; 790 (Km ² di deforestazione annua)
11	Greater acceptability, lower compensations required? The impact of perceived net benefits on willingness to accept nuclear energy projects.	Contu, D., Elshareif, E.E.	Distanza dalla centrale nucleare	20; 50; 100; 200 (Km)
			Riduzione scorie nucleari	Nulla; 10; 20; 30 (%)
			Riduzione emissioni GHG	Nulla; 10; 20 (%)
			Riduzione costo bolletta elettrica	Nulla; 10; 20; 30 (%)
			Costruzione strutture ospedaliere	Sì; No
			Attuazione misure di ripristino ambientale	Sì; No
Creazione parchi	Sì; No			

Continua

12	“I take the green one”: The choice of regional green electricity contracts in the light of regional and environmental identity.	Fait, L., Groh, E.D., Wetzel, H.	Mix energetico	Mix 1 (50% carbone, 50% nucleare); Mix 2 (34% carbone, 33% nucleare, 33% rinnovabili); Mix 3 (50% nucleare, 50% rinnovabili); Mix 4 (50% carbone, 50% rinnovabili); Mix 5 (100% rinnovabili)
			% di energia da rinnovabili prodotta localmente	0; 25; 50; 75; 100 (%)
			Fornitore energetico	Fornitore estero; Fornitore nazionale; Fornitore sovraregionale; Fornitore regionale; Fornitore locale
			Pagamento di un bonus per un anno di produzione di energia elettrica superiore alla media	Nessuno; Contributo alla quota associativa di una cooperazione energetica; Donazione ad un ente no profit regionale; Donazione ad un ente no profit ambientalista; Voucher per elettrodomestici a consumi energetici efficienti
			Variazione del costo annuo dell'elettricità	-30; -10; 0; +10; +30 (%)
13	Testing for saliency-led choice behavior in discrete choice modeling: An application in the context of preferences towards nuclear energy in Italy	Contu, D., Strazzer, E.	Distanza dalla centrale nucleare	20; 50; 100; 200 (Km)
			Riduzione scorie nucleari	Nulla; 10; 20; 30 (%)
			Riduzione emissioni GHG	Nulla; 10; 20 (%)
			Riduzione costo bolletta elettrica	Nulla; 10; 20; 30 (%)
			Costruzione strutture ospedaliere	Si; No
			Attuazione misure di ripristino ambientale	Si; No

Ad esempio, nell'esperimento di Plum et al. del 2019 che mirava a determinare le preferenze del pubblico per il sistema elettrico svizzero successivamente al *phaseout* nucleare, gli studiosi hanno riscontrato che la fonte di energia elettrica è l'attributo più importante per le scelte delle persone. I secondi attributi più importanti sono il gestore degli impianti (nazionale o estero) e l'aumento della bolletta elettrica mensile. Il terzo attributo più importante è l'ubicazione dell'impianto (nazionale, Paesi limitrofi, Paesi distanti). Tuttavia, gli attributi ubicazione, gestore e aumento della bolletta elettrica mensile sono risultati quasi ugualmente importanti per le scelte delle persone. L'attributo di gran lunga meno importante è l'impatto degli impianti sull'integrità visiva del paesaggio (Plum et al., 2019). Considerando l'ubicazione degli impianti di energia rinnovabile, si è riscontrato che la parte della popolazione svizzera intervistata preferiva la produzione nazionale alle importazioni di elettricità. Questa preferenza può essere incentivata da fattori quali i modelli di proprietà locale, l'autosufficienza e l'autarchia energetica (Ek e Persson, 2014) (McKenna, 2018). Quindi, la “svizzerità” dell'energia elettrica è risultato complessivamente un fattore

importante nel processo di scelta, confermando quanto già rivelato da Tabi e Wüstenhagen (2017). Ciononostante, sebbene la localizzazione nazionale sia apprezzata dai rispondenti, gli studi di Knapp e Ladenburg del 2015 hanno mostrato come nel caso dell'energia eolica, la preferenza delle persone aumenti con la distanza dalla posizione di tali impianti. Anche lo studio di Nakai et al. del 2018, che effettua un'analisi socio-tecnica delle preferenze dei consumatori della città di Tokyo sui sistemi energetici, riporta che le aziende con sede regionale e nazionale sono preferite come fornitori di energia, ma solo laddove vengano fornite informazioni aggiuntive sui possibili vantaggi e benefici economici per la comunità dei consumatori. Tale atteggiamento dei consumatori, però, muta nel momento in cui si parla di centrali nucleari. Infatti, come evidenziato nell'esperimento di Huh et al. del 2019, il livello di utilità e, di conseguenza di accettazione, diminuisce rapidamente con l'accorciarsi della distanza da una centrale nucleare, come confermato anche da Contu e Strazzerà (2021). Questo è vero indipendentemente dal livello di incentivi offerto per migliorarne l'accettabilità.

Un'ulteriore conferma che la vicinanza incide negativamente sull'utilità delle persone viene fornita dallo studio di Schneider e Zweifel del 2013. Infatti, i risultati mostrano come l'utilità marginale derivante da una copertura assicurativa aggiuntiva contro danni da incidenti nucleari diminuisca all'aumentare della distanza dall'impianto nucleare. Lo studio evidenzia anche come gli intervistati non siano solo preoccupati per i rischi associati all'energia nucleare, ma anche alla frequenza delle interruzioni di corrente (*blackout*). Oltretutto, Schneider e Zweifel fanno notare come gli intervistati attribuiscono la stessa importanza a una bassa frequenza di interruzioni di corrente allo stesso modo della soluzione del problema dello smaltimento delle scorie. Questo rimarca il ruolo cruciale dell'energia nel benessere sociale e sottolinea l'importanza di garantire una fornitura stabile ed adeguata di energia elettrica alla rete. Anche Boeri e Longo nel loro studio del 2017 hanno deciso di includere l'attributo "interruzioni di corrente", fornendo la seguente descrizione ai rispondenti: "Con l'aumento della domanda di elettricità, è probabile che si verifichi un aumento del numero e della durata dei *blackout*, poiché la rete potrebbe non essere in grado di soddisfare la domanda totale. Avere dei *blackout* significa che non c'è elettricità. Di conseguenza, non avremmo luce a casa, il frigorifero non funzionerebbe, così come gli ascensori, ecc. Anche la produzione industriale ne risentirebbe. Utilizzando le fonti rinnovabili, aumentiamo il numero di fonti da cui possiamo produrre elettricità, riducendo così il rischio associato alla dipendenza da fornitori di energia stranieri, in modo che l'interruzione di una delle fonti abbia effetti minori sull'approvvigionamento energetico

totale". Lo studio applicava un modello di riduzione del rimorso in scelte relative all'utilizzo di fonti rinnovabili, ma quello che interessa ai fini della trattazione è l'impatto negativo che un'interruzione di corrente può avere e che può incidere nella scelta di un mix energetico da parte del pubblico.

Un altro elemento che può incidere sulla composizione del mix energetico è la transizione energetica. Infatti, sebbene come precedentemente detto il costo delle bollette rappresenta un attributo di importante peso, lo studio di Kim et al. del 2020 mette in luce un altro aspetto in antitesi con questa tendenza: l'accettabilità da parte dei consumatori dell'aumento delle tariffe elettriche dovuto alla promozione della transizione energetica. Si può dunque concludere che l'opinione pubblica (sudcoreana nel caso di questo studio) può essere favorevole a sostenere un onere finanziario per sostenere la transizione energetica.

Per concludere, non sempre è possibile sfruttare il potenziale degli attributi per cogliere il comportamento di scelta dei consumatori. Infatti, le opzioni proposte al rispondente possono scatenare emozioni che a loro volta possono influenzare il comportamento di scelta (Araña, e León, 2008). Le persone possono mostrare modelli di scelta non compensativi che possono essere spiegati da un comportamento strategico. Infatti, come spiegano Contu e Strazzera (2021), se alcuni individui sono radicalmente contrari al nucleare, possono ignorare completamente gli attributi presentati nell'esperimento di scelta. Quindi, può accadere che alcuni intervistati fortemente contrari alle centrali nucleari si rifiutino di passare dall'opzione "No Nucleare" (qualora disponibile) alle alternative contenenti il nucleare. In altri casi invece, l'apparente comportamento di non negoziazione può essere causato dai diversi livelli di importanza attribuiti a specifici attributi da parte di alcuni intervistati. Per esempio, gli intervistati potrebbero scegliere sempre l'alternativa con il livello migliore di un singolo attributo: questo comportamento viene definito "dominanza degli attributi" ed è una forma di *attribute non attendance (ANA)*⁹⁸ (Johnson et al., 2019). La dominanza può essere spiegata dal fatto che gli intervistati valutano molto bene un attributo, mentre la variazione degli altri attributi è troppo ristretta per offrire una compensazione sufficiente per allontanarsi dal livello migliore dell'attributo preferito (Contu e Strazzera, 2021).

⁹⁸ L'*attribute non attendance* rappresenta un tipo di comportamento di scelta in cui gli individui ignorano uno o più attributi nelle domande dell'esperimento di scelta discreta (Lew e Whitehead, 2020).

3.3. Spunti tratti dalla ricerca

L'obiettivo del presente capitolo era di mettere in evidenza gli elementi percettivi e decisionali che influenzano le decisioni del rispondente in contesti di scelta in ambito energetico. L'accettabilità del nucleare rappresenta una questione divisiva a livello pubblico, accendendo un dibattito che può portare alla completa rinuncia o al graduale abbandono della fonte energetica. Tuttavia, i pochi studi condotti sulla percezione della fusione nucleare sembrano aprire uno spiraglio di più ampia accettazione pubblica, rispetto alla fissione, con aperture più o meno ampie da Paese a Paese. Inoltre, gli studi che hanno utilizzato esperimenti di scelta discreta hanno offerto spunti importanti nella scelta degli attributi e dei livelli utilizzati nell'esperimento, che verrà trattato nel prossimo capitolo. Infatti, l'importanza degli attributi deriva dal loro potenziale di influenzare le preferenze perché servono al rispondente da "segnali" di decisione, aiutandoli a riconoscere prima, e poi a perseguire, le opzioni che corrispondono ai loro obiettivi e preferenze personali (Ungemach et al., 2017). I risultati di questi studi costituiscono una potenziale risorsa, in quanto consentono al decisore politico di adattare in maniera consapevole gli sforzi di comunicazione pubblica e di *branding* della tecnologia riconoscendo le circostanze di accettabilità specifiche del contesto dell'introduzione prevista (Jones et al., 2021).

Capitolo 4

4. *Materiali e metodi*

Esaminata la letteratura scientifica esistente sulla fusione nucleare, risultata complessivamente esigua e, più ampiamente in ambito energetico, l'analisi dei DCE e la percezione dei rispondenti rispetto al nucleare tradizionale e da fusione hanno fornito le basi per impostare l'esperimento di scelta discreta che verrà trattato a partire dal presente capitolo. Dopo la presentazione del caso di studio e del metodo di elicitazione delle preferenze del consumatore DCE, verranno trattati gli attributi e relativi livelli selezionati, il disegno sperimentale e il metodo di campionamento e somministrazione del questionario elaborato ai fini della ricerca.

4.1. *Il caso di studio*

La domanda di ricerca del presente esperimento si riassume nella volontà di verificare l'accettabilità sociale in Italia della fusione nucleare, all'interno del mix energetico nazionale e, contestualmente, valutare quali attributi incidono maggiormente nel determinare l'accettabilità o meno di tale nuova tecnologia energetica. Quest'ultima non è ancora una tecnologia sfruttabile e si prevede che il suo sviluppo completo e prima implementazione commerciale saranno possibili intorno al 2050 circa. Di conseguenza, nello scenario di riferimento presentato ai rispondenti, si assumerà una situazione ipotetica in cui la tecnologia è già stata sviluppata ed è potenzialmente implementabile e verrà chiesto ai rispondenti se sono disposti ad accettare scenari ipotetici in cui il mix energetico contiene energia elettrica prodotta da fusione nucleare.

Per un futuro inserimento di questa innovativa tecnologia energetica, le cui opportunità e sfide sono state presentate nel capitolo 2, diviene dunque fondamentale capire come viene percepita dai consumatori energetici italiani. Lo studio mira in ultima analisi a fornire maggiori strumenti al decisore politico per migliorarne la percezione, progettando una comunicazione atta a rispondere agli eventuali timori verso una tecnologia energetica che, contenendo nel suo nome il termine "nucleare", rischia di trascinarsi dietro l'idea di pericolosità associata alla fissione nucleare.

La ricerca si è dunque focalizzata sull'individuazione degli aspetti valutati come salienti da un campione della popolazione, presentando ai rispondenti contesti di scelta composti da una serie di diverse alternative e dalla situazione attuale, ovvero lo status quo. Nel paragrafo successivo verrà trattato il metodo di elicitazione delle preferenze utilizzato nell'esperimento: il *Discrete Choice Experiment* (DCE).

4.2. *Il quadro concettuale alla base del DCE*

Il DCE è un metodo multi attributo di elicitazione delle preferenze del consumatore basato sull'utilizzo di questionari sviluppato e introdotto da Louviere e Woodworth nel 1983 nell'ambito del marketing. Permette di stimare i valori dei rispondenti in assenza di mercati osservabili, quando i servizi sono forniti gratuitamente o non sono ancora stati introdotti (Terris-Prestholt et al., 2019). Può misurare la forza delle preferenze tra gli attributi del servizio e può inoltre identificare dove le preferenze differiscono tra gli individui, il che risulta particolarmente utile quando interventi complessi prevedono di rivolgersi a gruppi di utenti specifici (Ibidem).

Nelle applicazioni del DCE, ad ogni intervistato vengono presentati un insieme predefinito di alternative o scenari, tra i quali il rispondente deve scegliere quello preferito (Riocchi, 2009). Gli scenari proposti sono tra loro mutualmente esclusivi. Molto spesso viene inserita anche un'alternativa di "non intervento", corrispondente allo status quo o situazione attuale. L'inserimento di tale opzione dà la possibilità agli intervistati di non scegliere alternative che non considerano procurare loro maggiore utilità di quella attuale, fornendo quindi un ulteriore elemento di valutazione per gli studiosi (Ibidem).

Il metodo DCE deriva dalla teoria di Lancaster del 1966, secondo cui qualsiasi bene può essere descritto da un insieme di attributi e dai livelli che questi possono assumere; il consumatore non ricava utilità dal bene in sé ma dagli attributi che lo compongono (Hendler, 1975). Si basa sull'applicazione del disegno statistico per costruire schede di scelta in cui i rispondenti sono chiamati a scegliere l'opzione o scenario preferito tra una serie di alternative mutualmente esclusive (queste sono tipicamente 2 o 3) differenziate per i livelli degli attributi (Train, 2009). Infatti, variando i livelli che gli attributi assumono tra le diverse alternative di scelta e includendo un attributo monetario, è possibile stimare il valore totale di un cambiamento in un bene o servizio e il valore degli attributi che lo compongono. Tali valori non vengono dichiarati direttamente dal rispondente, bensì emergono dalle scelte delle persone. Il DCE permette inoltre di calcolare anche le compensazioni non monetarie tra gli attributi. Come la valutazione contingente, anche il DCE può misurare tutte le forme di valore, inclusi i valori di non uso (Ibidem).

Il *Discrete Choice Experiment* condivide un quadro teorico comune con la valutazione contingente a scelta dicotomica nel modello *Random Utility Theory*, elaborato da McFadden nel 1973, come pure una base comune di analisi empirica nell'econometria a variabile dipendente limitata (Greene, 2008). Secondo take schema, la funzione di utilità indiretta per ogni individuo i (U) può essere scomposta in due parti: un elemento deterministico (V),

tipicamente specificato come un indice lineare degli attributi (X) delle ϕ differenti alternative nel set di scelta, e un elemento stocastico (e), che rappresenta l'insieme degli elementi non osservabili e catturabili dal modello che incidono sulla scelta individuale (Train, 2009). L'equazione 4.1 riporta quanto descritto.

$$U_{ij} = V_{ij}(X_{ij}) + e_{ij} = bX_{ij} + e_{ij} \quad [4.1]$$

Questo concetto viene dimostrato dall'equazione 4.2.

$$P[(U_{ig} > U_{ih}) \forall h \neq g] = P[(V_{ig} - V_{ih}) > (e_{ih} - e_{ig})] \quad [4.2]$$

È fondamentale a questo punto conoscere come si distribuiscono i termini di errore (e_{ij}) per poter ricavare un'espressione esplicita di tale probabilità. L'ipotesi più diffusa prevede che questi siano distribuiti in modo indipendente e identico seguendo una distribuzione a valori estremi tipo I, nota anche come distribuzione di Gumbel (equazione 4.3).

$$P(e_{ij} \leq t) = F(t) = \exp(-\exp(-t)) \quad [4.3]$$

Quest'ultima espressione implica che la probabilità che una specifica alternativa g sia oggetto di preferenza, e dunque di scelta da parte del rispondente, può essere espressa in termini di distribuzione logistica (McFadden, 1973). Questa specificazione prende il nome di *Conditional Logit Model* (equazione 4.4).

$$P(U_{ig} > U_{ih}, \forall h \neq g) = \frac{\exp(\mu V_{ig})}{\sum_j \exp(\mu V_{ij})} \quad [4.4]$$

μ rappresenta un parametro di scala inversamente proporzionale alla deviazione standard della distribuzione dei termini di errore e viene tipicamente assunto pari a 1 (Train, 2009). Un'importante implicazione di questa specificazione è che le selezioni dall'insieme di scelta devono obbedire alla proprietà dell'indipendenza dalle alternative irrilevanti (IIA), noto anche come assioma della scelta di Luce, elaborato dal medesimo nel 1959. Tale assioma afferma che le probabilità relative di selezione di due alternative non sono influenzate dall'inserimento o dalla rimozione di altre opzioni (Ibidem).

Tale modello può essere stimato con procedure di massima verosimiglianza. Nella funzione di massima verosimiglianza (equazione 4.5), y_{ij} è una variabile indicatore che assume il valore 1 se l'intervistato ϕ ha optato per l'alternativa i , e di 0 in ogni altro caso (Ibidem).

$$\log L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^J y_{ij} \log \left[\frac{\exp(V_{ij})}{\sum_{j=1}^J \exp(V_{ij})} \right] \quad [4.5]$$

È importante sottolineare che fornire agli intervistati una serie di schede di scelta non è tuttavia una pratica priva di problemi. In genere infatti, gli analisti trattano la risposta a ciascun insieme di scelta come un punto di dati separata. Ciò significa che le risposte a ciascuno degli insiemi di scelta presentati a ciascun rispondente vengono considerate come osservazioni indipendenti fra loro. Questo è logicamente errato, poiché è probabile che vi sia una certa correlazione tra i termini di errore di ciascun gruppo di insiemi considerati dallo stesso individuo. Di conseguenza, i modelli standard sovrastimano la quantità di informazioni contenute nel set di dati. Esistono procedure per affrontare questo problema: in alcuni casi è possibile effettuare una correzione ex post moltiplicando gli errori standard legati ai coefficienti di ciascun attributo per la radice quadrata del numero di domande somministrate a ciascun rispondente. Altri tipi di modelli utilizzati per stimare i dati DCE invece, come il *Random Parameters Logit*, correggono automaticamente questa distorsione all'interno del processo di stima (Ibidem).

Un ulteriore modello per stimare i dati DCE è rappresentato dal *Latent Class Model* (LCM). La teoria sottostante il LCM prevede che il comportamento individuale dipenda da attributi osservabili e da un'eterogeneità latente che varia in base a fattori non osservabili dall'analista (Greene e Hensher, 2003). Infatti, la variazione delle preferenze per gli attributi non viene considerata continua, bensì come discreta. L'ipotesi è che esistano C gruppi di individui, e che in ciascuno di questi gruppi, gli individui condividono una forma comune di funzione di utilità. Pertanto, si ipotizza che gli individui siano ordinati in un insieme di classi Q , ma quale classe contenga un particolare individuo, sia esso noto o meno, non è noto agli analisti (Ibidem). La probabilità di rientrare in una delle classi latenti è rappresentata dall'equazione 4.6

$$Pr(i) = \sum_{c=1}^C Pr(i|c) \times Pr(c) \quad [4.6]$$

4.3. *Attributi e livelli selezionati*

Come già trattato nel terzo capitolo, l'analisi della letteratura scientifica esistente su esperimenti di scelta discreta in ambito energetico ha permesso di individuare diversi attributi e livelli che potessero rientrare nel presente esperimento. A partire da questa moltitudine iniziale, sono stati scelti 4 attributi da includere nelle schede di scelta (*Choice cards*) con l'obiettivo di consentire al ricercatore di cogliere il massimo grado informativo per spiegare l'eterogeneità delle preferenze dei rispondenti. La scelta di un numero ridotto di attributi e livelli è tesa a semplificare il contesto di scelta per il rispondente, rendendolo cognitivamente processabile. La Tabella 4.1 riporta gli attributi con relativa spiegazione e i livelli associati ad ogni attributo impiegato nel questionario.

Tabella 4.1 – Attributi e livelli utilizzati nel DCE.

Attributi	Descrizione	Livelli
Nucleare (%)	Quota di fusione nucleare all'interno del mix energetico nazionale.	<i>10%</i>
		<i>25%</i>
		<i>40%</i>
		<i>60%</i>
Localizzazione produzione	Localizzazione delle centrali nucleari.	<i>Italia</i>
		<i>UE</i>
		<i>Extra-UE</i>
Interruzioni corrente annuali	Minuti aggiuntivi di interruzione della corrente rispetto alla media annuale nella situazione attuale.	<i>+20 minuti</i>
		<i>+10 minuti</i>
		<i>-10 minuti</i>
		<i>-20 minuti</i>
Variazione bolletta elettricità annuale	Variazione percentuale del costo sostenuto per i consumi di elettricità in un anno.	<i>+25%</i>
		<i>+10%</i>
		<i>-10%</i>
		<i>-25%</i>

Come emerso dallo studio di Plum et al. del 2019, gli studiosi hanno riscontrato che per i rispondenti la fonte di energia elettrica è l'attributo più importante nel processo di scelta. Coerentemente, la scelta dell'attributo *Nucleare (%)* mira a sondare il livello di accettabilità di questa tecnologia e in che misura i rispondenti italiani sono disposti a inserirla all'interno del portafoglio energetico nazionale. La scelta di una quota percentuale maggiore si dovrebbe tradurre in un effetto positivo per l'ambiente, in termini di emissioni clima alteranti evitate; ma laddove si decida di localizzare la produzione entro i propri confini, una quota maggiore di nucleare si tradurrà in un quantitativo maggiore di scorie nucleari da gestire, seppur quest'ultime relativamente esigue e meno radioattive rispetto al nucleare tradizionale. L'attributo *Localizzazione della produzione* era risultato il terzo attributo per importanza per gli intervistati del DCE di Plum et al.. Infatti, allo stesso modo, si è deciso di scegliere tre livelli che collocassero la produzione di energia da fusione da un contesto nazionale ad uno limitrofo europeo (UE), fino ad un contesto ritenuto dai rispondenti distante geograficamente. Una localizzazione nazionale favorirebbe una miglior sicurezza energetica, tuttavia, una localizzazione in territorio UE o extra-UE potrebbe aumentare il senso di sicurezza dei rispondenti. Rispetto al terzo attributo *Interruzioni corrente annuali*, è stato lo studio di Schneider e Zweifel (2013) a far notare come gli intervistati attribuiscano la stessa importanza ad una bassa frequenza interruzioni di corrente allo stesso modo della soluzione del problema dello smaltimento delle scorie. In questo caso, i livelli scelti possono comportare un aumento o una riduzione del tempo annuo di interruzioni di corrente. La scelta di non assegnare un segno unidirezionale risiede nel fatto che la variazione nel tempo di *blackout* potrebbero essere dovute a diverse cause, tra cui: utilizzo di una nuova tecnologia per la produzione elettrica (un miglioramento della stabilità della fornitura dipende sia dall'utilizzo della nuova tecnologia, sia da come questa si integrerà con le altre fonti energetiche); gestione nazionale o estera della produzione che potrebbe influenzare la qualità e la costanza della fornitura di energia elettrica (una gestione nazionale, sebbene migliori la sicurezza energetica, non necessariamente si traduce in una migliore gestione della tecnologia. Dall'altra parte, una gestione estera pone il ricevente energetico in una posizione subordinata al Paese erogatore e alle sue efficienze o inefficienze). Infine, l'attributo *Variazione bolletta elettricità annuale* mira a vedere quanto un eventuale aumento del costo dell'elettricità possa influire sulle scelte dei rispondenti. Anche in questo caso, il segno non è unidirezionale: La fusione nucleare potrebbe produrre grandi quantitativi di energia elettrica, facendo abbassare il costo dell'energia; dall'altra parte, i costi elevati e ancora incerti per sviluppare la tecnologia e costruire gli impianti potrebbe

far aumentare le bollette energetiche. Muovendoci su ipotesi, risulta difficile fare previsioni con certezza assoluta.

I livelli degli attributi sono stati successivamente combinati dal disegno sperimentale per generare la massima eterogeneità tra le alternative che compongono le schede di scelta del questionario. In pratica, il rispondente doveva scegliere tra tre differenti alternative: Scenario A, Scenario B oppure Situazione attuale. Quest'ultima opzione presuppone una volontà da parte del decisore di non voler sostituire lo status quo con nessuna opzione differente in questo queste non procurano una maggior utilità. La Figura 4.1 mostra l'esempio di scheda di scelta mostrata ai rispondenti prima di esprimere le proprie preferenze.

Figura 4.1 – Esempio di scheda di scelta presente nel questionario somministrato.

Scheda 0	SCENARIO DI PRODUZIONE A	SCENARIO DI PRODUZIONE B	SITUAZIONE ATTUALE
Nucleare (%)	25%	40%	Preferisco mantenere la situazione attuale
Localizzazione produzione	UE	Italia	
Interruzioni corrente annuali	+20 minuti	+10 minuti	
Variazione bolletta elettricità annuale	+10%	-25%	

Fonte: Elaborazione personale, 2022

4.4. Disegno sperimentale

L'individuazione degli attributi e dei livelli permettono, come appena mostrato, di generare le alternative di scelta che andranno a comporre le *choice cards* che verranno proposte nel questionario ai rispondenti. La combinazione dei livelli per generare le scelte non è casuale, bensì volto a massimizzare l'informazione ricavabile in fase di analisi dei dati e per l'elaborazione delle stime. Per il seguente DCE, è stato implementato un disegno sperimentale ortogonale ottimo (Street et al., 2005). È stato dunque possibile individuare come combinare le alternative (con livelli differenti per ciascuna alternativa componente la scheda di scelta) per massimizzarne il ruolo esplicativo delle preferenze dei rispondenti. Questo è possibile in quanto il disegno massimizza le differenze tra i livelli degli attributi tra le alternative e, quindi, massimizza l'informazione ottenuta dai rispondenti, obbligandoli a fare un *trade-off* per tutti gli attributi nell'esperimento di scelta discreta (Ibidem).

Il disegno utilizzato ha una misura di efficienza D optimality pari all'87,13%. Più il dato della D optimality si avvicina al 100%, più è efficiente il disegno sperimentale. Un dato che

si aggira intorno al 90% o superiore si traduce in un disegno con un'efficienza desiderabile, come nel caso del presente esperimento.

Il disegno sperimentale ha complessivamente generato 36 *choice card* ciascuna comprensiva di due alternative e lo status quo (come nella Figura 4.1). Per rendere il questionario cognitivamente meno impegnativo, si è adottato il metodo del *blocking* che ha consentito di dividere il totale delle schede in 4 blocchi, ognuno con 9 *choice card*. Questo non riduce le dimensioni del disegno, ma solo il numero di “schede” che ogni rispondente vede.

4.5. *Campionamento e somministrazione del questionario*

Lo studio e il questionario hanno come popolazione di riferimento la popolazione italiana. L'obiettivo dello studio è conoscere le preferenze dei consumatori energetici in Italia rispetto alla fusione nucleare. È stato a tal fine sviluppato un questionario online anonimo in lingua italiana rivolto a residenti in Italia maggiorenni. La piattaforma utilizzata per creare e somministrare il questionario è EU Survey, dove sono stati creati quattro questionari diversi, ciascuno contenente uno dei quattro blocchi di schede prima menzionati. Per la validità dei dati raccolti, è stata fissata una soglia di 400 risposte. Il questionario è stato proposto a maggiorenni residenti in Italia con provenienza regionale, condizioni socio-demografiche e conoscenze pregresse dell'argomento eterogenee di modo da creare un campione di riferimento il più possibile rappresentativo delle preferenze dei rispondenti. La somministrazione del questionario ha avuto luogo nel periodo compreso tra il 21 luglio 2022 e il 15 dicembre 2022. Totalmente sono state raccolte 449 risposte, di cui 444 valide.

Capitolo 5

5. *Analisi dei risultati*

Descritti i materiali e metodi sottostanti l'esperimento, l'ultimo capitolo sarà dedicato all'analisi dei dati raccolti tramite il questionario. Il campione di riferimento è composto da 444 rispondenti. Questi presentano caratteristiche eterogenee, in termini di provenienza regionale, caratteristiche demografiche, socio-economiche e attitudinali. L'obiettivo finale è rispondere alla domanda di ricerca e cogliere gli elementi salienti che incidono maggiormente nel processo scelta e, dunque, le preferenze dei rispondenti. I prossimi paragrafi saranno dedicati all'analisi del campione di riferimento.

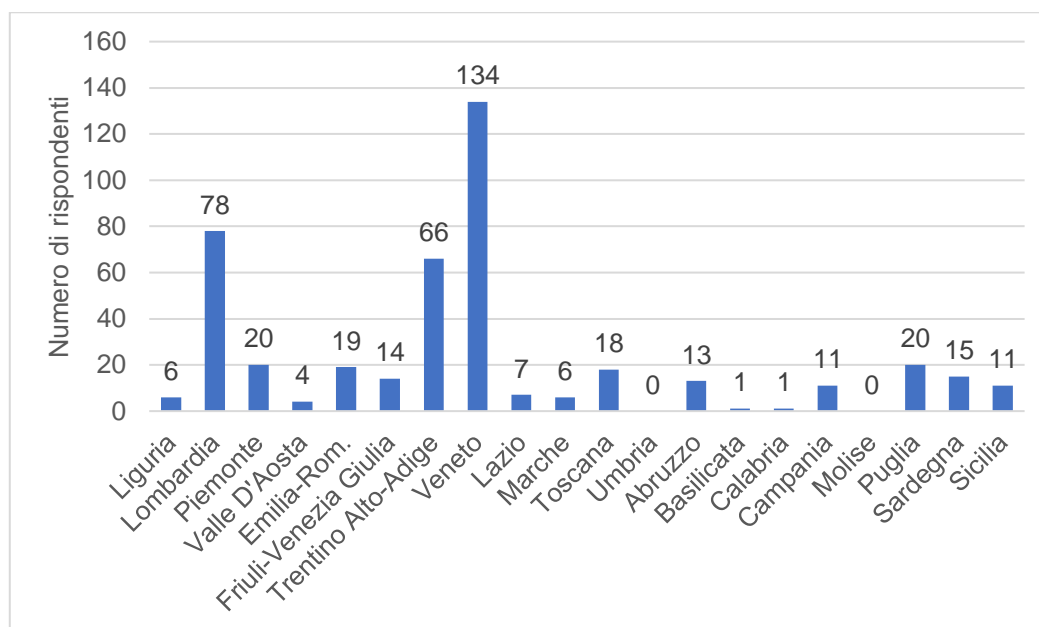
5.1. *Analisi del campione di riferimento*

5.1.1. *Demografia e caratteristiche socio-economiche*

La composizione del campione risulta equilibrata da un punto di vista di genere, in quanto simile alla suddivisione di genere a livello nazionale stimata dall'ISTAT, pari al 52,5% dei rispondenti di genere femminile (51,3% da dati ISTAT) e il 46,8% di genere maschile (48,7% da dati ISTAT). Lo 0,7% dei rispondenti ha preferito non dichiarare il proprio genere o non si identificava nei due precedenti. Da un punto di vista di provenienza regionale, sebbene il questionario avesse come confini tutto il territorio nazionale, una quota considerevole dei rispondenti risiede in tre principali regioni: Veneto (30,2%), Lombardia (17,6%) e Trentino Alto-Adige (14,9%). Queste tre regioni rappresentano oltre il 60% circa delle risposte, quando da dati ISTAT⁹⁹ le loro popolazioni incidono rispettivamente del 8,2%, 16,9% e 1,8%. Vi è dunque uno evidente squilibrio tra la situazione dell'esperimento e quella reale in termini di provenienza regionale. Le regioni che si classificano dopo, seppur con un distacco significativo, sono Piemonte, Puglia, Emilia Romagna e Toscana. Il grafico 5.1 mostra la ripartizione regionale delle risposte.

⁹⁹ Dati ISTAT riferiti al 2021.

Grafico 5.1. – Regione di residenza dei rispondenti.

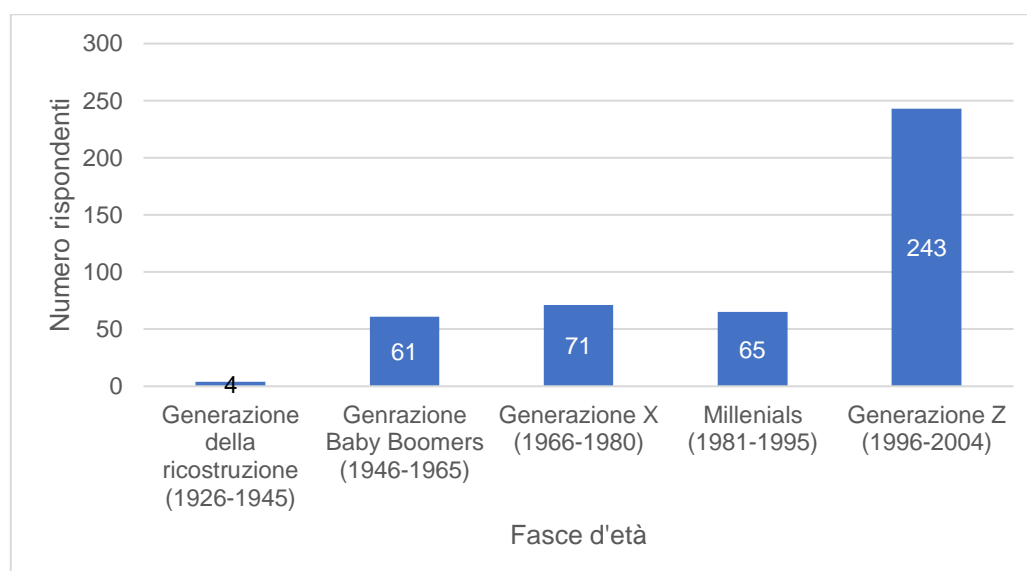


Fonte: propria elaborazione, 2023

Nel campione di riferimento, le regioni del Nord rappresentano il 76,8% dei rispondenti, quelle del Centro il 7% e quelle del Sud il 16,2%. Da dati ISTAT, emerge invece la seguente suddivisione: 46,4% Nord, 19,9% Centro e 33,7% Sud. Sempre in riferimento alla residenza, il 14,6% dei rispondenti risiede in comuni con popolazione inferiore a 5.000 abitanti, il 45,1% con popolazione compresa tra 5.000 e 50.000 abitanti e il 40,3% con popolazione superiore a 50.000 abitanti. Per questo dato non vi è un equivalente di confronto redatto dall'ISTAT.

Per quel che concerne l'età dei rispondenti, si è suddiviso il campione in fasce d'età per semplificare la lettura del dato. La suddivisione è stata effettuata sulla base delle generazioni culturali (Grafico 5.2).

Grafico 5.2 – Fasce d'età dei rispondenti.

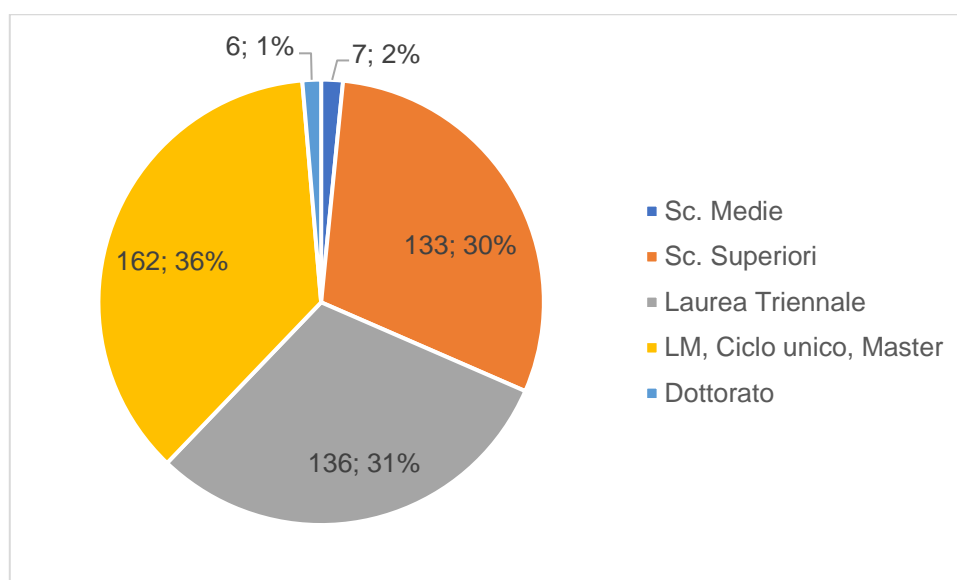


Fonte: propria rielaborazione, 2023

La fascia d'età che ha contribuito maggiormente in termini di risposte è stata quella 1996-2004, nota anche come Generazione Z, rappresentando più della metà dei rispondenti del campione. L'ISTAT utilizza una suddivisione 0-14, 15-64, over 65 anni per rappresentare le fasce d'età. Una tale suddivisione sarebbe stata poco efficace a conoscere il campione di riferimento in quanto non sono inclusi gli under 18. Per ovviare e permettere una forma di confronto, si può utilizzare il dato dell'età media. L'età media del campione di riferimento è di 36 anni, contro una media nazionale di 45,9 anni (Istat, n.d). Questo conferma una sovra rappresentazione delle fasce più giovani e una minor rappresentatività del campione.

Proseguendo, il questionario chiedeva di dichiarare il titolo di studio per comprendere il grado di istruzione del campione (Grafico 5.3). Come si evince dai dati almeno il 67% dei rispondenti ha conseguito almeno una laurea triennale. Nel 2021, l'ISTAT ha stimato che solo il 20% della popolazione italiana nella fascia 25-64 fosse in possesso di una laurea, dunque il campione di riferimento dell'esperimento ha un grado di istruzione sensibilmente più elevato. Tuttavia, il dato non sorprende dato il grado di istruzione tendenzialmente più elevato dei Millennials e Generazione Z, i quali compongono oltre due terzi del campione di riferimento.

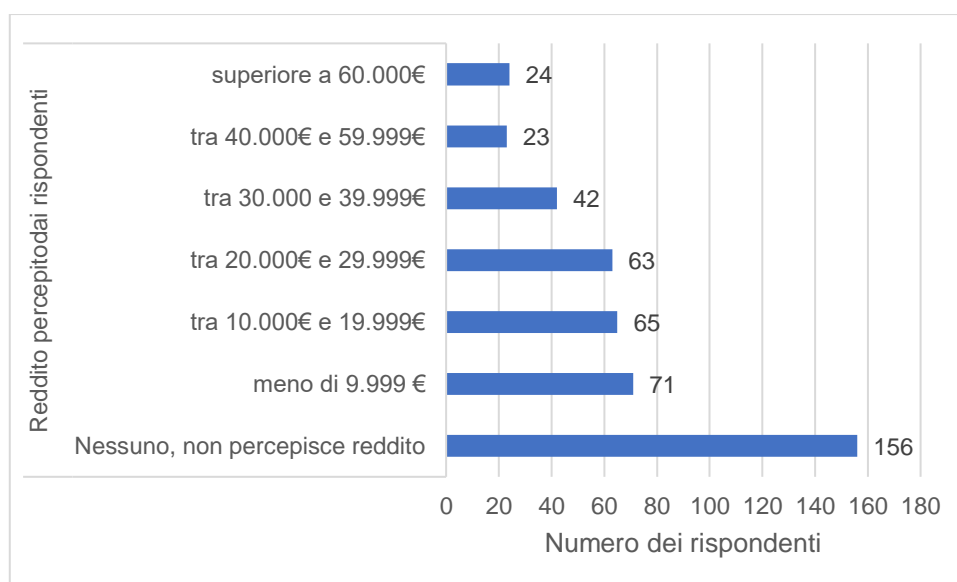
Grafico 5.3 – Titolo di studio dei rispondenti.



Fonte: propria rielaborazione, 2023

Indagando lo stato occupazionale del campione, quest'ultimo risulta suddiviso in due macro gruppi: 50% circa di occupati e 40% circa di studenti. La restante parte si suddivide, in ordine, tra pensionati e disoccupati. Una percentuale elevata di studenti risulta coerente con la età media relativamente bassa del campione di riferimento. Coerentemente, a livello reddituale, vi è un terzo del campione circa che dichiara di non aver percepito reddito nell'anno 2021. Il Grafico 5.4 mostra il reddito individuale al netto delle imposte percepito dai rispondenti nel 2021.

Grafico 5.4 – Reddito netto percepito dai rispondenti nel 2021.



Fonte: propria rielaborazione, 2023

Oltre al reddito individuale, ai rispondenti veniva chiesto un altro dato monetario: una stima della spesa per la bolletta elettrica sostenuta nell'anno precedente. Questa informazione è stata richiesta non tanto ai fini dell'analisi, quanto più per consentirgli di avere in mente un costo di riferimento tramite cui calcolare la disponibilità a spendere in più o il vantaggio derivante dal risparmio in base a quanto proposto dalle *choice card* per l'attributo *Variatione bolletta elettricità annuale* (Figura 4.1 pag. 127). La creazione di tale ancora ha lo scopo di produrre dati più rispondenti alle reali preferenze degli intervistati, mitigando l'effetto dell'*Hypothetical bias*¹⁰⁰ causato dal contesto ipotetico della scelta (Hensher, 2010).

Entrando maggiormente nella sfera familiare, ai rispondenti è stato chiesto se e quanti figli avessero. Se la risposta risultava affermativa, veniva loro chiesto quanti di questi avessero un'età inferiore ai 12 anni. Su 444 rispondenti, 126 (28,4%) hanno dichiarato di essere genitori di figli. Di questi, 30 (6,8%) avevano almeno un figlio con età inferiore a 12 anni. Per cogliere quanto il campione di riferimento sia sensibile alle tematiche ambientali, è stato chiesto ai rispondenti se fossero iscritti ad associazioni ambientaliste (ad es. WWF, LIPU, ecc.). Solo il 7,9% del campione risulta iscritto ad associazioni con tali finalità.

Infine, come ultima domanda socio-demografica, ai rispondenti è stato chiesto di dichiarare il proprio orientamento politico. Il 48% del campione si posiziona a sinistra, il 37,4% a centro, e il 14,6% a destra.

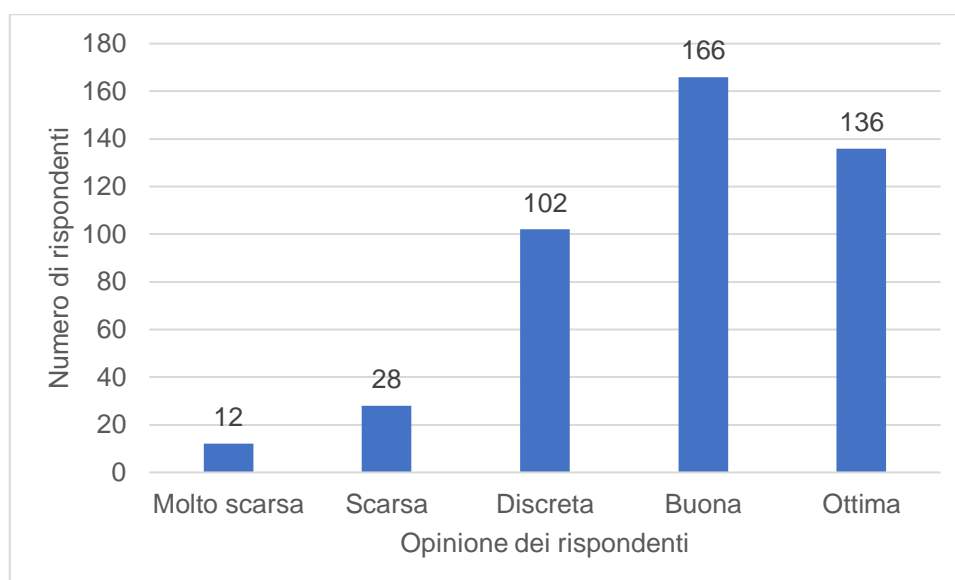
5.1.2. *Percezioni e opinioni del campione di riferimento*

Prima di analizzare le scelte, e dunque le preferenze, dei rispondenti, è opportuno analizzare come il campione di riferimento percepisce la fusione nucleare e quali sono le sue conoscenze e opinioni in ambito energetico.

Dopo la parte introduttiva sulla fusione nucleare presente nella prima parte del questionario, in cui veniva descritta la nuova tecnologia energetica con relativi vantaggi e problematiche, sorge spontaneo chiedersi quale sia una prima opinione complessiva della fusione nucleare da parte dei rispondenti. Da questa prima domanda, emerge un inequivocabile apprezzamento della tecnologia, almeno a livello teorico (Grafico 5.5). Infatti, il 68% dei rispondenti ritiene che la fusione nucleare sia una buona tecnologia energetica, se non addirittura ottima. Il 91% la considera una tecnologia energetica almeno discreta.

¹⁰⁰ Si verifica quando gli individui riferiscono ai ricercatori comportamenti o valori non rispondenti alle proprie reali preferenze nei sondaggi o negli studi sperimentali. In altre parole, ciò che gli individui dicono che farebbero ipoteticamente non è necessariamente ciò che farebbero nella realtà (Hensher, 2010).

Grafico 5.5 – Opinione dei rispondenti sulla fusione nucleare.



Fonte: propria rielaborazione, 2023

Questa prima valutazione positiva è nuovamente confermata da un'altra domanda nell'indagine sulle opinioni presentata ai rispondenti. Nello specifico, veniva chiesto ai rispondenti di scegliere l'opzione che meglio rappresentava la loro visione sulla fusione nucleare: Visione a) *La fusione nucleare potrebbe rappresentare un'importante fonte di energia elettrica e i Paesi interessati dovrebbero finanziarne la ricerca*; Visione b) *La fusione nucleare potrebbe essere o non essere una fonte praticabile di energia elettrica. Dovremmo continuare la ricerca sulla fusione nucleare ma dare priorità ad altre fonti energetiche*; Visione c) *La fusione nucleare è una fonte energetica non necessaria e pericolosa. Dovremmo ridurre o cancellare il programma di ricerca e investire in fonti energetiche o programmi alternativi*. Il 50,4% dei rispondenti si rispecchiava nella Visione "a", il 42,6% nella Visione "b" e solo il 7% nella Visione "c". Ciò significa che il 93% dei rispondenti ha un'opinione favorevole rispetto l'investimento nello sviluppo della fusione nucleare, pur consapevoli in parte che altre fonti energetiche allo stato attuale meritano maggiore attenzione per l'urgente transizione energetica.

L'indagine sulle opinioni è stata effettuata avvalendosi soprattutto di scale Likert da 1 a 5, dove: 1=Per niente d'accordo; 2=Non d'accordo; 3=Non saprei; 4=D'accordo; 5=Molto d'accordo. Per entrare maggiormente nel dettaglio delle opinioni dei rispondenti, la Tabella 5.1 riporta quello che hanno mediamente risposto alla domanda "*Ritengo che la fusione nucleare...*".

Tabella 5.1. – Indagini sulle opinioni dei rispondenti alla domanda “*Ritengo che la fusione nucleare...*”. In evidenza il peso delle risposte.

Domanda	Opinione media	Numero di risposte		
		“Non saprei”	1-2 ¹⁰¹	4-5 ¹⁰²
...sia tecnologicamente impraticabile.	2,28	124 (27,9%)	278 (62,6%)	42 (9,5%)
...sia troppo costosa da sviluppare (in termini di investimenti nella ricerca, sviluppo e verifica della fattibilità).	2,67	117 (26,3%)	218 (49,1%)	109 (24,6%)
...contribuisca positivamente sul sistema energetico (in termini di sicurezza energetica, diversificazione delle fonti di approvvigionamento, etc.).	3,88	43 (9,7%)	55 (12,4%)	346 (77,9%)
...abbia un impatto positivo sull’ambiente (in termini di potenziale impatto sulla terra, l’acqua, l’atmosfera, etc.).	3,52	101 (22,7%)	89 (20%)	254 (57,2%)
...abbia un impatto negativo sulla salute umana.	2,53	147 (33,1%)	223 (50,2%)	74 (16,7%)
...sia competitiva (in termini di prezzo dell’elettricità prodotta).	3,62	131 (29,5%)	53 (11,9%)	260 (58,6%)

Fonte: propria rielaborazione, 2023

La ragione per cui nella tabella si è deciso di evidenziare per primo il dato “Non saprei” (pari al valore 3), risiede nell’abbondanza di dati medi che si aggirano attorno ad un valore pari a 3,00. Ciò può essere dovuto al fatto che i rispondenti ancora non conoscono bene la tecnologia energetica e quindi non si sbilanciano con opinioni più marcate, oppure, nonostante l’apparente atteggiamento favorevole, vogliono adottare un approccio di cautela dato che si tratta comunque di “nucleare”. Analizzando più approfonditamente i dati, c’è un tendenziale ottimismo sul completo sviluppo della tecnologia (2,28). Si riconosce anche il ruolo positivo che potrebbe avere nel migliorare la sicurezza energetica di un paese (3,88). Ancora, per valutare l’opinione dei rispondenti nel più generale ambito energetico, è stato chiesto sempre con scala Likert di esprimere quanto fossero in accordo o in disaccordo con le affermazioni presenti nella Tabella 5.2.

¹⁰¹ 1=Per niente d’accordo; 2=Non d’accordo.

¹⁰² 4=D’accordo; 5=Molto d’accordo.

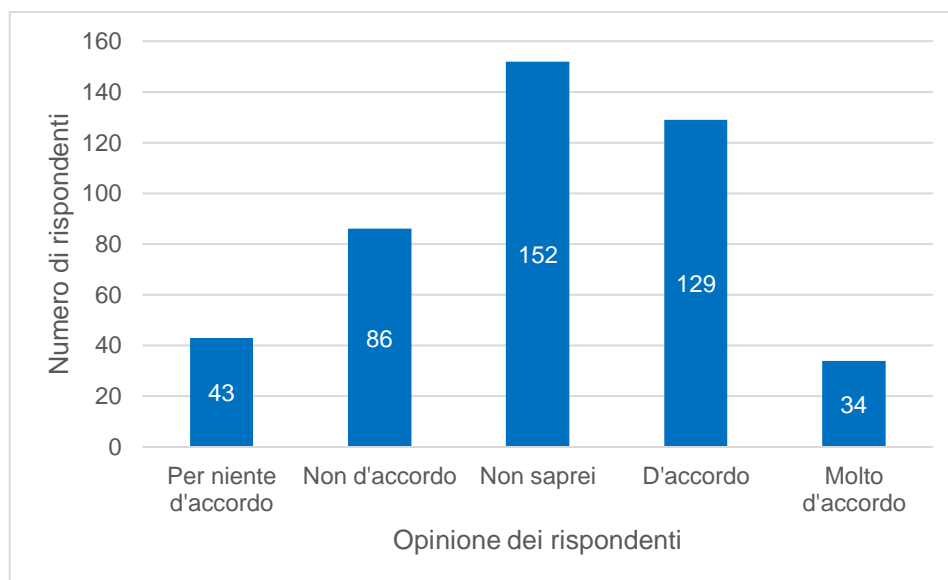
Tabella 5.2 – Indagine sulle opinioni dei rispondenti in ambito energetico. In evidenza il peso delle risposte “Non saprei”.

Affermazione	Opinione media	Numero di risposte		
		“Non saprei”	1-2	4-5
L’accesso all’energia e la continuità dell’erogazione incidono sul benessere della società.	4,27	28 (6,3%)	13 (2,9%)	403 (90,8%)
La produzione di energia rappresenta oggi una fonte di emissioni di gas serra.	4,05	70 (15,8%)	18 (4%)	356 (80,2%)
L’uso di fonti energetiche fossili (carbone, petrolio e gas naturale) concorrono al fenomeno del riscaldamento globale.	4,52	23 (5,2%)	9 (2%)	412 (92,8%)
Le fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, idroelettrico, etc.) potrebbero sostenere l’intero fabbisogno elettrico giornaliero nazionale.	2,73	139 (31,3%)	200 (45%)	105 (23,7%)
L’energia nucleare tradizionale (fissione) rappresenta una fonte energetica a basse emissioni.	3,06	152 (34,2%)	129 (29,1%)	163 (36,7%)
Si dovrebbe utilizzare in misura maggiore l’energia nucleare tradizionale (fissione) per la produzione di energia elettrica.	2,91	113 (25,5%)	178 (40%)	153 (34,5%)
L’Italia gode di un accesso sicuro alle fonti energetiche.	2,46	155 (34,9%)	235 (52,9%)	54 (12,2%)
Si può soddisfare l’attuale e futura domanda energetica utilizzando le tecnologie attualmente a disposizione, senza necessità di svilupparne di nuove.	1,90	54 (12,2%)	354 (79,7%)	36 (8,1%)

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Rispetto alle prime tre affermazioni, i rispondenti mediamente dimostrano una chiara consapevolezza del ruolo che gioca l’energia nel determinare il livello di benessere della società e dell’impatto clima-alterante del settore energetico, in particolare quando deriva dalla combustione di fonti fossili. Più incerta risulta invece l’opinione sulle affermazioni successive. In particolare, risultano interessanti le due affermazioni relative alla fissione nucleare. Infatti, sebbene la Figura 2.15 (pag. 82) mostra come il nucleare tradizionale risulta, nell’arco del ciclo di vita della tecnologia, la fonte energetica in assoluto meno inquinante a livello di emissioni, appena il 36,7% dei rispondenti si dichiara d’accordo o molto d’accordo con l’affermazione (Grafico 5.6). Il 29%, che rappresenta una quota considerevole, risulta in disaccordo o per niente d’accordo con l’affermazione.

Grafico 5.6 – Distribuzione delle opinioni all’affermazione: *L’energia nucleare tradizionale (fissione) rappresenta una fonte energetica a basse emissioni.*

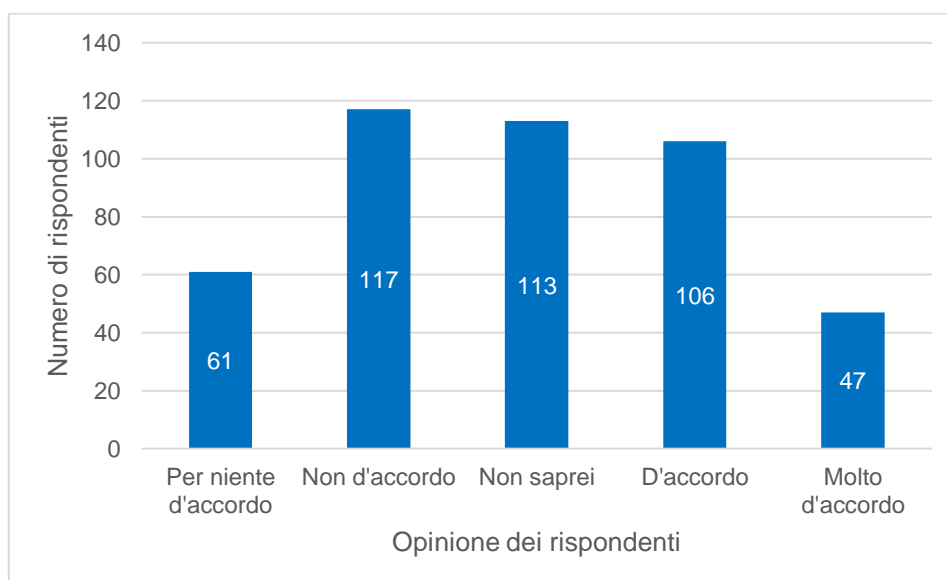


Fonte: propria rielaborazione, 2023

Questi dati potrebbe evidenziare una potenziale disinformazione rispetto all’impatto ambientale del nucleare tradizionale, oppure, potrebbero essere influenzati dalla posizione controversa in cui si colloca tale tecnologia energetica, la quale presenta diversi vantaggi, ma anche criticità significative. Ciò potrebbe portare i rispondenti a preferire una risposta neutrale (*Non saprei*) in quanto un sentimento negativo di disagio induce all’evitamento. Infatti, le persone tendono a evitare di parlare di cose che le fanno sentire a disagio (Schwarz, 2011).

Continuando l’analisi delle opinioni, l’affermazione “*Si dovrebbe utilizzare in misura maggiore l’energia nucleare tradizionale (fissione) per la produzione di energia elettrica*” è quella che ha prodotto maggiore polarizzazione, confermato anche dalla deviazione standard, la più elevata tra tutte le affermazioni a cui rispondere (pari a 1,212). Il Grafico 5.7 mostra quanto l’affermazione sia divisiva.

Grafico 5.7 – Distribuzione delle opinioni all'affermazione: *Si dovrebbe utilizzare in misura maggiore l'energia nucleare tradizionale (fissione) per la produzione di energia elettrica.*



Fonte: propria rielaborazione, 2023

Mediamente, l'opinione a quest'ultima affermazione tende al disaccordo, dunque ad una tendenziale avversione all'utilizzo al nucleare tradizionale. Questo dato risulta in linea con i risultati di Cicia et al. (2012) e di Contu e Elshareif (2021).

Per concludere l'analisi delle opinioni, i rispondenti riconoscono che l'Italia non gode di una sicurezza energetica robusta. Infatti, anche l'Energy Trilemma Index, seppur assegnai una valutazione positiva alla sicurezza energetica italiana, riconosce che vi è un'eccessiva dipendenza dalle importazioni estere di energia (WEC, n.d). Nel caso del questionario, il dato potrebbe essere più negativo della norma a causa della guerra russo-ucraina, che ha inevitabilmente creato una crisi energetica nazionale, con prezzi dei carburanti e del gas cresciuti sensibilmente. Infine, il campione di riferimento riconosce l'urgenza di trovare tecnologie energetiche che possano sostenere una domanda energetica in continua crescita e che consentano la transizione energetica verso un futuro *carbon neutral*.

5.2. Analisi delle preferenze

Analizzate le caratteristiche socio-demografiche e le opinioni dichiarate dai rispondenti, i prossimi paragrafi saranno dedicati all'analisi delle preferenze espresse dai componenti del campione nei contesti di scelta presentati attraverso le *choice card*. L'analisi permetterà di comprendere più a fondo il peso degli attributi nei processi di scelta e, attraverso le interazioni, prevedere se alcuni comportamenti di scelta possono essere collegati a determinate caratteristiche dei rispondenti. I dati sono stati analizzati utilizzando i modelli

Multinomial Logit (MNL), Random Parameter Logit (RPL) e Latent Class (LC). L'analisi è stata effettuata mediante il ricorso al software Nlogit.

5.2.1. Confronto tra Multinomial Logit e Random Parameter Logit

Per un confronto delle differenze tra i modelli di stima MNL e RPL, è opportuno avvalersi degli indici di bontà della stima dei modelli (Tabella 5.3). Guardando i dati relativi alla funzione Loglikelihood¹⁰³ e il Akaike Information Criterion (AIC)¹⁰⁴, il modello che più si adatta ai dati è l'RPL. Quest'ultimo modello permette di cogliere l'eterogeneità nelle preferenze dei singoli rispondenti e la correlazione tra le scelte del singolo rispondente.

Tabella 5.3 – Informazioni e indicatori di bontà della stima dei modelli MNL e RPL.

	Multinomial Logit	Random Parameter Logit
NC	441	441
NO	3.969	3.969
K	6	11
F_LogLKH	-3.629,46957	-3.119,58043
AICn	1,832	1,578
McF_P-R ²		0,2845643

Legenda: NC = Numerosità campione; NO = Numero osservazioni; K = Parametri; F_LogLKH = Funzione LogLikelihood; AICn = Indice di Akaike normalizzato; McF_P-R² = Indice Pseudo-R² di McFadden

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Per la stima dei due modelli, sono stati utilizzate le risposte di 441 rispondenti. Le rimanenti tre risposte per completare il campione sono state scartate in quanto i relativi rispondenti, avendo sempre scelto lo status quo in tutte le *choice card*, hanno motivato il comportamento di scelta con affermazioni (fornite al rispondente) che facessero intendere la natura di protesta delle risposte. Dunque, non essendovi corrispondenza con le reali preferenze dei

¹⁰³ La funzione di verosimiglianza, o *Maximum Likelihood Estimate* (MLE), è un elemento chiave sia per la stima dei parametri β che per la valutazione del modello. Questo metodo comporta l'ottimizzazione della funzione di verosimiglianza sullo spazio dei parametri (van Opheusden et al., 2020). Solitamente nei problemi MLE si preferisce utilizzare il logaritmo della funzione, ovvero il loglikelihood. Più è elevata la verosimiglianza, più elevato sarà il valore della funzione; contestualmente, più il suo logaritmo si avvicinerà allo zero.

¹⁰⁴ L'AIC fornisce una misura della bontà della stima di un modello statistico. In pratica, tenta di misurare quante informazioni vengono perse tramite l'utilizzo di un modello per descrivere il problema sotto analisi.

$$AIC = 2k - 2\ln(L)$$

Nella formula: k è il numero di parametri da stimare; L è il valore massimizzato della funzione di massima verosimiglianza del modello stimato (Akaike, 1974).

tre rispondenti, tali risposte, potenzialmente distorsive dei risultati, non sono state considerate. Nello specifico, due rispondenti hanno motivato la continua scelta dello status quo con la motivazione “*Ho bisogno di maggiori informazioni*”, mentre il terzo con la motivazione “*Mi oppongo al modo in cui viene chiesta la mia preferenza*”.

La Tabella 5.5 mostra i risultati della stima dei modelli dei parametri random, i quali sono tutti caratterizzati da una significatività all’1% ad eccezione del parametro Nf_prcent che nel MNL è significativo al 5% e nel RPL al 10%. Tali valori di significatività confermano la presenza di eterogeneità nelle preferenze dei rispondenti, ipotesi sostenuta anche dai parametri NS, confermando la ragione per cui si è deciso di utilizzare il modello RPL. Invece, prendendo in considerazione gli errori standard, questi sono quasi sempre più piccoli per il modello MNL, segnalando una maggior precisione della stima.

Tabella 5.4 – Parametri e loro descrizione.

Parametri	Descrizione
Nf_prcent	Quota di fusione nucleare all’interno del mix energetico nazionale (10%; 25%; 40%; 60%).
Prod_It	Localizzazione delle centrali nucleari da fusione in Italia.
Prod_UE	Localizzazione delle centrali nucleari da fusione in Paesi UE.
Int_corr	Variatione tempo (in minuti) dell’interruzione della corrente rispetto alla media annuale nella situazione attuale (+20 min; +10 min; -10 min; -20 min).
Sq	Status quo (mix energetico composto da 41,7% fonti rinnovabili, 7,9% carbone, 43,2% gas naturale, 0,5% prodotti petroliferi, 3,6% nucleare tradizionale e 3,1% da altre fonti) ¹⁰⁵ .
Var_cost	Variatione percentuale del costo sostenuto per i consumi di elettricità in un anno (+25%; +10%; -10%; -25%).

¹⁰⁵ Mix energetico nazionale per la produzione elettrica riferito al 2019.

Tabella 5.5 – Significatività dei parametri in MNL e RPL.

Parametri	Multinomial Logit		Random Parameter Logit	
	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*
Nf_prcnt	0,33031** [0,13297]	0,0130	0,49886* [0,25977]	0,0548
Prod_It	0,61692*** [0,05684]	0,0000	0,85338*** [0,10253]	0,0000
Prod_UE	0,69912*** [0,5857]	0,0000	1,05527*** [0,09331]	0,0000
Int_corr	-0,00833*** [0,00169]	0,0000	-.01311*** [0,00250]	0,0000
Sq	-0,20410*** [0,07547]	0,0068	-0,96523*** [0,18118]	0,0000
Var_cost	-3,65175*** [0,14247]	0,0000	-5,77888*** [0,25607]	0,0000
NsNf_prc			3,70025*** [0,30597]	0,0000
NsProd_I			1,46825*** [0,11732]	0,0000
NsProd_U			1,06553*** [0,11444]	0,0000
NsInt_co			0,02336*** [0,00375]	0,0000
NsSq			2,26190*** [0,19169]	0,0000

***, **, * Significatività al 1%; 5%; 10%. Ns = statistica sul parametro random; Var_cost è un parametro non random per la funzione di utilità.

Fonte: propria rielaborazione, 2023

5.2.2. Analisi dei coefficienti

Confrontati i due modelli di stima, è possibile affermare che entrambi restituiscono stime dei parametri con significatività all'1% in quasi tutti i casi (Tabella 5.5). Questo si traduce

in un contributo di tutti gli attributi nell'influenzare la scelta dei rispondenti. Le stime permettono di quantificare il peso di tale influenza e il segno.

Partendo dall'attributo *Nf_prnt*, questo è l'unico parametro con una significatività più bassa rispetto agli altri parametri, pari al 5% nel modello e MNL e pari al 10% nel modello RPL. Il segno positivo denota una maggior utilità derivante dalla presenza nel mix energetico e, da un consumo maggiore, di energia da fusione nucleare.

Per quel che concerne l'attributo della localizzazione della produzione, i livelli *Prod_It* e *Prod_EU* sono entrambi significativi all'1% e sono misurati utilizzando come base la produzione di energia da fusione in un Paese extra-europeo. In entrambi i modelli il dato è significativo e positivo, lasciando intendere che una produzione di energia nucleare da fusione è preferita quando questa avviene a livello nazionale o, ancora meglio, a livello EU. Infatti, la grandezza del parametro indica la forza nel determinare la scelta e, in entrambi i modelli, i coefficienti della produzione in Paesi UE sono superiori ai coefficienti della produzione in Italia, confermando tale ipotesi.

Proseguendo, il parametro *Int_corr* è significativo ed ha segno negativo. Il segno negativo si traduce in una disutilità per il rispondente ad un aumento del tempo annuo delle interruzioni di corrente. Tuttavia, essendo prossimo allo zero, non risulta essere un elemento che incide molto sulle scelte dei rispondenti. Il parametro *status quo* invece, oltre ad essere sempre significativo, ha un valore negativo decisamente più elevato, segnalando una preferenza per gli scenari diversi dallo *status quo*, il quale se scelto non produrrebbe una maggior utilità al rispondente. Lo *status quo* prevede il non inserimento del nucleare da fusione nel mix energetico nazionale per la produzione di energia elettrica, preferendo l'attuale mix energetico composto da: 41,7% fonti rinnovabili, 7,9% carbone, 43,2% gas naturale, 0,5% prodotti petroliferi, 3,6% nucleare tradizionale (esportato da Francia e Svizzera) e 3,1% da altre fonti.

Infine, non sorprende che l'attributo *Var_cost* sia, oltre che significativo, negativo. Ciò si traduce in una disutilità crescente per i rispondenti all'aumentare del costo delle bollette dell'elettricità. Inoltre, questo attributo risulta essere il più importante nel determinare le scelte dei rispondenti, confermato dal coefficiente più elevato in termini assoluti (nel RPL pari a -5,77888).

La Tabella 5.6 riporta le disponibilità a pagare (WTP, o *willingness to pay*) per gli attributi che sono stati considerati in entrambi i modelli. Le WTP sono state calcolate a partire dai coefficienti dei parametri nel seguente modo:

$$WTP_k = - \frac{\beta_k}{\beta_{cost}}$$

Dove k indica il coefficiente degli attributi non monetari.

Tabella 5.6 – Disponibilità a pagare per ogni unità percentuale aggiuntiva dell'attributo k.

Parametri	WTP MNL	WTP RPL
Nf_prct	0,09045	0,08632
Prod_It	0,16894	0,14767
Prod_UE	0,19145	0,18261
Int_corr	-0,00228	-0,00227
Sq	-0,05589	-0,16703

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Partendo dal parametro Nf_prct, per ogni punto percentuale aggiuntivo di fusione nucleare nel mix energetico, i rispondenti sono mediamente disposti a pagare €0,09 (WTP MNL) in più circa per ogni € di bolletta. Affinché la produzione energetica da fusione nucleare avvenga in Italia o in UE, i rispondenti pagherebbero mediamente €0,17 e €0,19 rispettivamente in più per ogni € di bolletta. Diverso il caso delle interruzioni di corrente che creando una disutilità, si manifesta con una disponibilità a pagare marginale negativa, seppur prossima allo zero. Stesso ragionamento da effettuarsi per lo status quo.

Dovendo fare un confronto, utilizzando le WTP MNL, i rispondenti hanno una disponibilità a pagare maggiore per una produzione di energia da fusione in Paesi UE. Si tratta di una disponibilità a pagare quasi doppia per un'unità percentuale in più di energia da fusione nucleare. Osservando le stime delle WTP, è evidente una lieve preferenza per la produzione a livello UE rispetto ad una a livello nazionale. Maggiore la WTP in termini assoluti di un parametro, maggiore il suo peso sulla scelta del rispondente.

5.2.3. Eterogeneità delle preferenze e interazioni

L'analisi fino a qui condotta conferma che le preferenze dei rispondenti differiscono all'interno del campione di riferimento trattato. Tale eterogeneità può essere catturata includendo interazioni tra attributi e caratteristiche individuali specifiche (Lancasar et al, 2017). Le Tabelle 5.7 e 5.8 permettono di fare una comparazione di come cambia la bontà della stima tra i modelli con soli effetti principali e con interazioni.

Tabella 5.7 – Modello MNL con soli effetti principali e con interazioni a confronto.

	MNL senza interazioni	MNL con interazioni
NC	441	441
NO	3.969	3.969
K	6	18
F_LogLKH	-3.629,46957	-3.479,22324
AICn	1,832	1,762

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Tabella 5.8 - Modello RPL con soli effetti principali e con interazioni a confronto.

	RPL senza interazioni	RPL con interazioni
NC	441	441
NO	3.969	3.969
K	11	23
F_LogLKH	-3.119,58043	-3.087,11934
AICn	1,578	1,567
McF_P-R ²	0,2845643	0,2920088

Fonte: propria rielaborazione, 2023

In entrambi i modelli, l'introduzione degli effetti interazione ha migliorato la bontà delle stime. Ciò è più consistente nel modello MNL ed è in entrambi i casi evidenziato da un avvicinamento allo zero dei valori F_LogLKH e AICn e da un incremento dello Pseudo-R² (McF_P-R²) per il modello RPL.

5.2.4. Analisi ed interpretazione delle interazioni

Al fine di cogliere le caratteristiche sottostanti l'eterogeneità delle scelte da parte dei rispondenti, si è deciso di indagare l'effetto di alcune interazioni tra attributi e variabili, selezionate per l'analisi in quanto ritenute possibilmente idonee a spiegare tale eterogeneità. La Tabella 5.9 elenca le interazioni selezionate.

Tabella 5.9 – Variabili di interazioni selezionate.

Nome variabile	Interazione delle variabili	Descrizione
Nf_Op	Nf_prct*Op_fn_d	Percentuale fusione nucleare nel mix energetico*Opinione fusione nucleare
Educ_Sq	Educ*Sq	Anni di istruzione*Status quo
Child_Sq	Children*Sq	Presenza figli*Status quo
It_Visa	Prod_it*Vis_a	Localizzazione in Italia delle centrali da fusione nucleare*Visone “a” della tecnologia
Ex_genf	Prod_ex*Gender_f	Localizzazione in Paesi extra-UE delle centrali da fusione nucleare*Genere femminile
Ex_Dx	Prod_ex*Destra	Localizzazione in Paesi extra-UE delle centrali da fusione nucleare*Orientamento politico di destra
Popb_Sq	Pop_b*Sq	Residenza in comune con popolazione inferiore a 5.000 abitanti*Status quo
Provn_Sq	Prov_n*Sq	Province del Nord*Status quo
Provc_Sq	Prov_c*Sq	Province del Centro*Status quo
Genf_Sq	Gender_f*Sq	Genere femminile*Status quo
Dx_Nf	Destra*Nf_prct	Orientamento politico di destra*Status quo
Assamb_Sq	Ass_amb*Sq	Iscrizione ad associazioni ambientali*Status quo

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Tabella 5.10 – Risultati completi dei modelli MNL e RPL comprensivi di interazioni.

Parametri	Multinomial Logit		Random Parameter Logit	
	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*
Nf_prct	-3,46930*** [0,33818]	0,0000	-4,14987*** [0,86385]	0,0000
Prod_It	0,54401*** [0,09521]	0,0000	0,77762*** [0,16884]	0,0000
Prod_UE	0,85972*** [0,08308]	0,0000	1,27191*** [0,13041]	0,0000
Int_corr	-0,00863*** [0,00172]	0,0000	-.01307*** [0,00250]	0,0000
Sq	-1,24786*** [0,34364]	0,0003	-0,01307*** [1,07510]	0,0000
Var_cost	-3,82282*** [0,14702]	0,0000	-5,80488*** [0,25585]	0,0000

Continua

NsNf_prc			3,70025*** [0,30597]	0,0000
NsProd_I			1,46825*** [0,11732]	0,0000
NsProd_U			1,06553*** [0,11444]	0,0000
NsInt_co			0,02336*** [0,00375]	0,0000
NsSq			2,26190*** [0,19169]	0,0000
Nf_Op	4,10416*** [0,32786]	0,0000	4,95958*** [0,87976]	0,0000
Educ_Sq	0,04512** [0,1936]	0,0198	0,06535 [0,06116]	0,2853
Child_Sq	0,07529 [0,09646]	0,4350	-0,09658 [0,30651]	0,7527
It_Visa	0,45567*** [0,08873]	0,0000	0,57421*** [0,18969]	0,0025
Ex_genf	0,27436*** [0,09711]	0,0047	0,39547*** [0,14928]	0,0081
Ex_Dx	-0,00621 [0,13744]	0,9640	0,04254 [0,20488]	0,8355
Popb_Sq	0,45234*** [0,11486]	0,0001	0,52736 [0,38681]	0,1728
Provn_Sq	0,45874*** [0,11792]	0,0001	0,84474** [0,35361]	0,0169
Provc_Sq	-0,03227 [0,07408]	0,6631	-0,11463 [0,28240]	0,6848
Genf_Sq	0,05114 [0,09228]	0,5795	0,05668 [0,28089]	0,8401
Dx_Nf	0,29136 [0,28542]	0,3075	0,35117 [0,70111]	0,6165

Continua

Assamb_Sq	-0,70342*** [0,20487]	0,0006	-1,28425* [0,69516]	0,0647
-----------	--------------------------	--------	------------------------	--------

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Rispetto ai modelli senza interazioni, l'introduzione di queste impatta fortemente sull'attributo Nf_prct, il quale diventa significativo all'1%, di segno negativo e acquisisce un valore del coefficiente molto più elevato rispetto alla Tabella 5.5 (pag. 141). Questi nuovi valori si traducono in un'avversione dei rispondenti all'aumento della quota di fusione da nucleare all'interno del mix energetico, pur accettandolo. Gli altri effetti principali invece rimangono invariati nella loro interpretazione.

Per quel che concerne le interazioni (Tabella 5.10), non tutte sono significative al 10%, 5% o 1%. Le interazioni Child_Sq, Ex_Dx, Provc_Sq, Genf_Sq e Dx_Nf non risultano significative nel modello MNL e RPL, ad eccezione di Educ_sq e Popb_Sq che non sono significative solo nel modello RPL. Avere figli è una condizione che porta a scegliere lo status quo (il mix energetico attuale) nel modello MNL, lasciando intendere che i genitori sono meno favorevoli all'utilizzo della fusione nucleare. Al contrario, il dato nel modello RPL è negativo, lasciando supporre il contrario. Utilizzando il Sud come base, non vi è una tendenza dei rispondenti del Centro di preferire lo status quo. Anche nel caso dell'attributo Genf_Sq, si era inizialmente ipotizzato una maggiore probabilità di scelta dello status quo da parte del genere femminile, in quanto dallo studio di Schneider e Zweifel (2013) emerge una maggiore avversione al rischio (in questo caso rappresentato dalla fusione nucleare che potrebbe essere percepita come tale), tuttavia non riscontrata. Infine, per l'ultima interazione, non risulta esserci una correlazione significativa tra chi vota destra e un consumo maggiore di energia da fusione nucleare.

Passando alle interazioni significative, risulta esservi correlazione tra chi sceglie di localizzare le centrali da fusione nucleare in Italia e chi ha una visione "a" della tecnologia energetica (It_Visa), ovvero dichiara: *La fusione nucleare potrebbe rappresentare un'importante fonte di energia elettrica e i Paesi interessati dovrebbero finanziarne la ricerca*. Per l'interazione Ex_Genf, vi è una correlazione tra localizzazione in Paesi extra_UE delle centrali a fusione nucleare e il genere femminile, evidenziando un'avversione al rischio del genere femminile già riscontrato nello studio di Schneider e Zweifel (2013) pocanzi menzionato. I modelli stimano una correlazione positiva tra chi risiede al Nord e un'attitudine più marcata a scegliere lo Sq. Questo dato tuttavia potrebbe

risultare distorto a causa della stragrande maggioranza dei rispondenti provenienti dalle regioni del Nord (76,8% del campione), dunque è opportuno lasciare un punto interrogativo sulla correlazione. Infine, chi è iscritto ad associazioni ambientaliste (Assamb_Sq) tende a preferire scenari che prevedono l'utilizzo della fusione nucleare rispetto allo status quo, risultando complessivamente favorevole a questa tecnologia energetica.

Per concludere l'analisi delle interazioni, il modello MNL stima significative Educ_Sq e Popb_Sq. Il segno positivo implica che vi è una relazione positiva tra anni di studio e la scelta dello status quo e che i rispondenti che vivono in comuni con numero di abitanti inferiore a 5.000 abitanti sono più propensi alla scelta dello status quo. Tuttavia Il modello RPL, scelto in quanto restituisce una bontà di stima superiore, non evidenzia tali correlazioni.

5.2.5. Applicazione del Latent Class Model

Ipotizzando che l'accettazione della fusione nucleare possa rappresentare un tema polarizzante, si è proceduto, oltre alla stima tramite MNL e RPL, all'utilizzo di un modello *Latent Class Model* (LC) per spiegare il problema.

La Tabella 5.11 riporta gli indicatori di bontà della stima LC.

Tabella 5.11 – Informazioni e indicatori di bontà della stima del modello LC a 2 e 3 classi.

	LC a 2 classi	LC a 3 classi
NC	441	441
NO	3.969	3.969
K	13	20
F_LogLKH	-3.605,78428	-3.588,88981
AICn	1,824	1,819
McF_P-R ²	0,1730596	0,1769342

Fonte: propria rielaborazione, 2023

La bontà della stima del LC a due e tre classi è pressoché uguale, con una lieve superiorità di quello a tre classi. Data la stessa bontà di stima, si è optato per l'utilizzo dell'LC a due classi in quanto consente di evidenziare meglio la polarizzazione verso il nucleare.

Il LC a due classi suddivide il campione in due gruppi eterogenei fra di loro ed omogenei nelle preferenze delle loro rispettive composizioni. La probabilità che un individuo del campione faccia parte della Classe 1 è del 64% circa, mentre la probabilità che faccia parte

della Classe 2 è del 36% circa. La Tabella 5.12 mette in evidenza i coefficienti e la loro significatività per le due classi latenti.

Tabella 5.12 – Risultati modello LC con due classi

Parametri	Classe 1		Classe 2	
	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*	Coeff. [err. st.]	Prob. z >Z*
Nf_prct	1,05749** [0,51119]	0,0386	-0,23624 [0,49127]	0,6306
Prod_It	2,10343*** [0,31390]	0,0000	-0,72952 [0,68637]	0,2878
Prod_UE	1,76728*** [0,27237]	0,0000	-0,12341 [0,28857]	0,6689
Int_corr	-0,02688*** [0,00587]	0,0000	0,00054 [0,00595]	0,9278
Sq	0,47663 [0,29754]	0,1092	-0,58765** [0,23992]	0,0143
Var_cost	-7,68607*** [1,22510]	0,0000	-1,01024* [0,58047]	0,0818
PrbCls1	0,64010*** [0,08902]	0,0000		
PrbCls2			0,35990*** [0,08902]	0,0001

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Guardando i coefficienti dei parametri ed i rispettivi segni, è possibile descrivere le preferenze delle due classi latenti. Gli individui facenti parte della Classe 1 traggono una maggiore utilità dalla presenza di una quota maggiore di nucleare da fusione all'interno del mix energetico (valore del coefficiente 1,05749**). Oltre a ciò, la localizzazione della produzione rappresenta un elemento fondamentale della scelta, dove una produzione energetica da fusione a livello nazionale (2,10343***) viene fortemente preferita rispetto ad una produzione extra-UE e preferita anche rispetto ad una produzione EU (coefficiente 1,76728***). Infine, la variazione di costo per questa classe latente rappresenta il parametro più importante ai fini della preferenza, dove vi è un'elevata disutilità da un aumento delle bollette (-7,68607***).

Dall'altra parte, gli individui del gruppo 2 si muovono tendenzialmente nella direzione opposta, con una lieve avversione verso un aumento della quota del nucleare da fusione all'interno del mix energetico, dato tuttavia non significativo. Oltre a ciò, va evidenziata una preferenza per una produzione distante dal Paese di residenza, dunque extra-UE, confermata dai coefficienti negativi dei parametri Prod_It e Prod_UE. Significativo e negativo, invece, il coefficiente dello Status quo (-0,58765**), il quale segnala che gli individui all'interno della Classe 2 siano poco propensi a scegliere uno scenario senza energia da fusione nucleare nel mix energetico, indicando una preferenza implicita per la tecnologia energetica. Infine, i componenti della Classe 2 sono anch'essi avversi ad un aumento delle bollette (-1,01024*), ma in misura minore rispetto ai componenti dell'altra classe.

Per riassumere le caratteristiche di queste due classi, possiamo descrivere gli individui appartenenti al gruppo 1 come “sostenitori entusiasti”, i quali preferiscono una quota maggiore di fusione nucleare all'interno del mix energetico e, una produzione preferibilmente nazionale o almeno a livello UE. Invece, gli individui della Classe 2 possono essere descritti come “Sostenitori moderati”, accettando la fusione nucleare in quote più contenute rispetto all'altro gruppo e con una produzione distante dall'Italia.

Le WTP delle Classi 1 e 2 sono rappresentate nella Tabella 5.13.

Tabella 5.13 – Disponibilità a pagare per ogni unità percentuale aggiuntiva dell'attributo k.

Parametri	WTP Classe 1	WTP Classe 2
Nf_prct	0,13759	-0,23384
Prod_It	0,27367	-0,72213
Prod_UE	0,22993	-0,12216
Int_corr	-0,00350	-0,00053
Sq	0,06201	-0,58169

Fonte: propria rielaborazione, 2023

Risultano di interesse alcune WTP che confermano quanto già esposto nella Tabella 5.11. In particolare, la disponibilità a pagare per un'unità percentuale in più di energia prodotta a livello nazionale (Prod_It) è positiva per la Classe 1 (€0,23 circa per ogni € di bolletta) e significativamente negativa per la Classe 2 (-€0,72 circa per ogni € di bolletta). Cambia drasticamente la WTP nella Classe 2 per la localizzazione, con una avversione decisamente marcata per una produzione energetica nazionale rispetto ad una UE (rispettivamente -€0,72 e -€0,12 circa). Allo stesso modo, vi è una contrapposizione per l'attributo Nf_prct, con una WTP marginale positiva per la Classe 1 (€0,14 circa) e negativa per la Classe 2 (-€0,23 circa) (per ogni € di bolletta).

5.3. Spunti per il decisore politico

Laddove il decisore politico italiano volesse a tutti gli effetti ricorrere all'utilizzo dell'energia da fusione nucleare, quando questa dovesse essere una tecnologia energetica sfruttabile, è importante che abbia consapevolezza delle preferenze dei consumatori energetici (la società). Complessivamente, il campione di riferimento riconosce i pregi della fusione nucleare ed è favorevole all'investimento nello sviluppo della medesima. Infatti, il 93% del campione di riferimento è favorevole all'investimento nella ricerca e sviluppo della fusione nucleare. Questo è coerente con l'esigenza, espressa dai rispondenti, di trovare fonti energetiche che consentano di sostenere la crescente domanda energetica futura e, di portare a termine la transizione ecologica verso un sistema a zero emissioni. Tale accettazione favorevole viene confermata anche dalle caratteristiche emerse dalle preferenze delle due classi di individui identificate dal Latent Class Model. Queste due classi però presentano caratteristiche differenti fra loro ed è importante che il decisore politico ne tenga conto per adattare i suoi sforzi comunicativi.

I modelli MNL e RPL evidenziano che mediamente, i consumatori accettano che siano presenti centrali da fusione in Italia, ma preferirebbero una localizzazione limitrofa nei Paesi UE. L'alternativa meno apprezzata è il livello extra-UE. Questo può essere spiegato da una maggior sicurezza energetica percepita. Esempio è il caso delle crisi petrolifere e della guerra russo-ucraina che hanno messo in crisi il sistema energetico nazionale. Anche il costo incide notevolmente sulla scelta, con costi dell'energia da fossili in aumento che rendono un ulteriore aumento della bolletta energetica molto poco accettabile per il campione di riferimento.

Dall'altra parte, il nucleare tradizionale riconferma ancora una volta la sua posizione controversa e dibattuta, creando una visione polarizzata, ma tendente al suo non utilizzo e

non inserimento nel mix energetico nazionale. È importante notare dalle risposte nell'indagine sulle opinioni del questionario che vi è un possibile grado di disinformazione rispetto al funzionamento e all'impatto ambientale del nucleare tradizionale. Sarebbe opportuno che il decisore politico consapevolizzi la società sugli effettivi vantaggi e sfide poste da tale tecnologia, prima ancora di confrontarla con la fusione nucleare, la quale, a parte i possibili costi e difficoltà di sviluppo, risulta migliore in tutti i suoi aspetti. È importante che la comunicazione metta chiaramente in evidenza che la fusione costituisce una fonte energetica sicura e pulita, capace di soddisfare le future esigenze energetiche per un tempo virtualmente infinito. È necessario limitare il rischio che la fusione nucleare si trascini la reputazione, per molti negativa, della fissione nucleare.

In particolare, laddove vi fosse la volontà di implementare la tecnologia a livello nazionale, il decisore politico deve effettuare un'opera di rassicurazione e convincimento ancora maggiore nei confronti del genere femminile, risultato, coerentemente con altri studi, più avverso al rischio rispetto al genere maschile. Infatti, la preferenza tendenziale del genere femminile risulta essere una collocazione delle centrali mediamente più distante dall'Italia. Inoltre, per una maggior accettabilità sociale, l'energia prodotta dalla fusione nucleare dovrà necessariamente risultare competitiva rispetto alle alternative.

Un ulteriore elemento di valutazione, per una comunicazione più efficace dei vantaggi associati alla fusione nucleare, può essere costituito dal coinvolgimento delle associazioni ambientaliste, le quali possono fungere da cassa di risonanza e da ente di giudizio imparziale sull'impatto positivo che questo avrebbe sull'ambiente in primo luogo, e sul benessere delle persone di riflesso. Si ritiene possa essere una collaborazione valida data la correlazione tra chi è iscritto ad associazioni ambientaliste e l'accettazione favorevole della fusione nucleare.

Quanto emerso da questa analisi costituisce una base per adattare gli sforzi di comunicazione pubblica e di branding della tecnologia da parte del decisore politico che, conoscendo gli elementi che incidono maggiormente sul comportamento di scelta degli individui, può tarare la comunicazione per mettere in risalto gli elementi che favoriscono l'accettazione della tecnologia e, concepire forme di compensazione e informazione per gli elementi che ne inficiano l'accettabilità sociale.

Conclusioni

L'energia è la risorsa più importante a livello mondiale, fondamentale per determinare il benessere di una società. I singoli Paesi, per costruire economie prospere e competitive, devono garantire una fornitura continua e sicura di energia, offrendola a prezzi accessibili e, limitando il più possibile l'impatto ambientale; devono quindi misurarsi con la sfida posta dal *World Energy Trilemma*. A complicare la questione vi è la crescita della popolazione mondiale e dei consumi energetici, che richiederà in maniera sempre più critica di un approvvigionamento costante e sostenibile di energia, e la sfida climatica, che è essenzialmente una sfida energetica. Infatti, tre quarti delle emissioni di CO₂ mondiali derivano dal settore energetico, raggiungendo nel 2019 quota 36,7 Gt. Il livello preoccupante di emissioni ha portato i Paesi e le organizzazioni partecipanti alla COP25 a stabilire una necessaria contrazione delle emissioni di CO₂, per contenere l'aumento medio delle temperature entro 1,5°C per il 2050. La natura transnazionale dei mercati energetici e delle questioni ambientali richiede dunque un approccio che supera il livello nazionale.

Le sfide poste dal trilemma energetico non rappresentano una sfida facile per i decisori politici, i quali devono disegnare politiche energetiche adeguate alle esigenze nazionali ed internazionali, ripensando alle fonti energetiche disponibili e alle tecnologie da mettere in campo per compiere la transizione verso un'economia climaticamente neutrale. La valutazione complessiva di una fonte energetica non si basa solo su quanto sia pulita; deve anche essere affidabile, accessibile e conveniente. A tal fine, è utile che vi sia comprensione a livello socio-politico delle caratteristiche delle differenti fonti e tecnologie energetiche e sui *trade-off* che ciascuna presenta, considerandone vantaggi e svantaggi. Tutte le principali fonti energetiche, ad oggi presenti nei mix energetici mondiali, presentano pregi e difetti. Anche le fonti rinnovabili, da molti ritenute come le fonti che sosterranno il sistema energetico futuro, all'attuale livello di sviluppo, presentano criticità che non le rendono una soluzione priva di limiti. Problemi relativi all'intermittenza nella produzione, allo stoccaggio energetico e alla dipendenza da materie prime difficili da reperire, renderebbero necessario l'affiancamento di fonti energetiche flessibili per una fornitura energetica affidabile. Le fonti fossili presentano chiari ostacoli per il loro forte effetto clima-alterante. Il nucleare da fissione (tradizionale) rimane dibattuto e contestato da molti per i rischi alla salute e all'ambiente che può provocare, reputazione che i disastri nucleari di Chernobyl e di Fukushima hanno contribuito a plasmare.

Delineati i limiti delle principali fonti energetiche impiegate oggi, la promessa della fusione nucleare di fornire energia pulita, con rischi ridotti rispetto alla fissione e, per un tempo virtualmente infinito, sembra poter risolvere molti dei limiti prima esposti. Le difficoltà ingegneristiche relative allo sviluppo di questa promettente tecnologia energetica la renderanno auspicabilmente sfruttabile attorno al 2050. Del progresso fatto nel suo sviluppo è significativo il risultato dell'esperimento del 5 dicembre 2022 conseguito al Lawrence Livermore National Laboratory in California, Stati Uniti, in cui per la prima volta è stato ottenuto un bilancio positivo di energia dal processo di fusione.

In questo contesto di *trade-off*, è fondamentale che i governi riescano a comunicare gli obiettivi e le motivazioni sottostanti le politiche energetiche e ambientali approvate per ottenere il sostegno popolare e facilitare la transizione energetica. Ciò richiederà un linguaggio comune. Infatti, è proprio l'accettazione sociale la sfida più grande nel processo di transizione energetica. A tal fine, è importante per il decisore politico avere cognizione di quali siano le percezioni e l'accettabilità sociale verso questa nuova tecnologia, la quale rischia di trascinarsi dietro la reputazione negativa della fissione nucleare. Con lo scopo di determinare gli elementi che incidono maggiormente sull'accettabilità sociale della fusione in Italia, è stato condotto un *Discrete Choice Experiment*.

Utilizzando i modelli di stima MNL e RPL, si è scoperto che i rispondenti tendono a preferire gli scenari contenenti energia da fusione nucleare, preferendoli di conseguenza al mix energetico attualmente fornito che non la contempla. È stato riscontrato un parere favorevole del campione alla fusione nucleare, in particolare, laddove le centrali da fusione vengano collocate in Paesi dell'UE. Anche una produzione nazionale è accettata, ma generando minor utilità nei rispondenti. Il costo, prevedibilmente, è risultato un attributo determinante nel processo di scelta, con un'avversione ad un aumento dei costi delle bollette elettriche. Ultimo, l'attributo relativo alle interruzioni di corrente che, pur creando disutilità, non sembra aver impattato in maniera trainante sulle scelte dei rispondenti.

Oltre a questi risultati, al fine di cogliere la polarizzazione tipica rivolta verso il nucleare, è stato stimato anche un *Latent Class*. Ciò che è emerso è che il campione si suddivide in due gruppi, il primo rappresentato dai "sostenitori entusiasti" della fusione nucleare, il secondo dai "sostenitori moderati". I primi preferiscono una quota maggiore di fusione nucleare all'interno del mix energetico e una produzione preferibilmente nazionale o almeno a livello UE. I secondi invece accettano la fusione nucleare in quote più contenute rispetto all'altro gruppo e con una produzione distante dall'Italia.

È opportuno evidenziare i punti di forza che rendono lo studio innovativo, ma anche i punti di debolezza e possibili miglioramenti per produrre risultati più robusti.

Il primo punto di forza risiede nel contributo informativo verso il decisore politico nazionale, il quale prima ancora che la tecnologia energetica trattata sia sfruttabile, può lavorare preventivamente sul *branding* di questa, rafforzandone la percezione positiva e agendo sugli aspetti che destano preoccupazione nei rispondenti. Infatti, i risultati del DCE permettono di cogliere in maniera più precisa quali sono gli attributi e livelli che incidono maggiormente, sia positivamente che negativamente, sul processo di scelta degli individui e delle loro preferenze. Oltre alle preferenze, è stato possibile stimare anche misure monetarie, ossia le disponibilità a pagare marginali per determinate variazioni nei livelli degli attributi.

Un altro punto di forza del presente studio risiede nella sua novità. Infatti, ad oggi, questo è il primo e unico studio che vede l'utilizzo di un *Discrete Choice Experiment* per elicitarle le preferenze dei consumatori rispetto alla fusione nucleare.

Rispetto alle debolezze del presente esperimento, vi è in primo luogo la potenziale difficoltà dell'argomento trattato, risultando in un questionario relativamente esteso che per alcuni può essere risultato difficile da completare. La lunghezza del questionario era una condizione pressoché inevitabile, in quanto era necessario fornire al rispondente le informazioni necessarie affinché conoscesse e comprendesse la fusione nucleare e le sue caratteristiche. Il carico cognitivo elevato, tuttavia, può aver generato risultati distorti, sia per la difficoltà dell'argomento, sia per i tempi necessari a concludere il questionario (circa 15 minuti) che potrebbero aver portato i rispondenti a comportamenti di scelta non ottimizzanti per concludere in maniera più rapida lo stesso.

Un'ulteriore punto di debolezza risiede nella rappresentatività del campione. Da un lato vi è il problema di un campione con una preponderanza di rispondenti appartenenti alla Generazione Z, dall'altra vi è la preponderanza ancora più marcata del contributo delle regioni del Nord, in particolare di tre regioni: Veneto, Lombardia e Trentino Alto-Adige. Una miglior rappresentatività della popolazione di riferimento è certamente un obiettivo da perseguire per migliorare i risultati dello studio e renderli più fruibili per il decisore politico italiano.

L'ultimo punto di criticità dello studio è da attribuirsi al periodo storico in cui si è svolto. Infatti, i dati del questionario sono stati raccolti nel corso della guerra tra Russia e Ucraina, la quale, insieme alla ripresa dell'economia post Covid-19, ha fatto aumentare sensibilmente i prezzi dei carburanti e, in particolare del gas naturale, da cui l'Italia dipende

significativamente per il suo mix energetico. Ad agosto 2022, il prezzo al Megawattora al mercato TTF del gas di Amsterdam ha toccato quota €339, un aumento del 530% in un anno, con aumenti sulle bollette altrettanto significativi (Greco, 2022). La crisi energetica può dunque aver distorto le preferenze dei rispondenti in ambito energetico.

Bibliografia

A future based on renewable energy (2022, 28 novembre). *European Environmental Agency*. <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2022/articles/a-future-based-on-renewable-energy>

Akaike, H. (1974) A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, no. 6. 716-723. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1100705>

Akrofi, M.M (2021). An analysis of energy diversification and transition trends in Africa. *International Journal of Energy and Water Resources* 5. 1–12. <https://doi.org/10.1007/s42108-020-00101-5>

Alriksson, S., Öberg, T. (2008). Conjoint analysis for environmental evaluation. *Environmental Science and Pollution Research*, 15 (3). 244–257. <https://link.springer.com/article/10.1065/espr2008.02.479>

API (2014). *Acidizing*. <https://www.api.org/~media/files/oil-and-natural-gas/hydraulic-fracturing/acidizing-oil-natural-gas-briefing-paper-v2.pdf>

Araña, J.E., León, C.J. (2008). Do emotions matter? Coherent preferences under anchoring and emotional effects. *Ecological Economics*, Volume 66, Issue 4. 700-711. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800907005332>

ARPAV (2009). *Il risparmio energetico in ufficio. Le azioni quotidiane che fanno bene all'ambiente*. <https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni/il-risparmio-energetico-in-ufficio.-le-azioni-quotidiane-che-fanno-bene-allambiente/>

Ashgar, Z. (2008). Energy–GDP relationship: a causal analysis for the five countries of south Asia. *Applied Econometrics and International Development*, Vol. 8-1 (2008). 167. <https://www.usc.gal/economet/reviews/aeid8114.pdf>

ATSDR (1999). *Sulfur Dioxide*. <https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts116.pdf>

ATSDR (2002). Nitrogen Oxides (nitric oxide, nitrogen dioxide, etc.). <https://www.atsdr.cdc.gov/toxfaqs/tfacts175.pdf>

Austin, F. (2016). *The world energy trilemma: progress toward balanced sustainable energy remains slow*. Oliver Wyman. 2. <https://www.oliverwyman.com/content/dam/oliver-wyman/global/en/2016/mar/Energy-Journal/Energy%20Trilemma-online.pdf>

Austin, F., Nottingham, L. (2018, 18 ottobre). Can Energy Be Secure, Affordable, and Sustainable as the Sector Transforms? *Brink*. <https://www.brinknews.com/can-energy-be-secure-affordable-and-sustainable-as-the-sector-transforms/>

Barolini, A. (2019, 4 dicembre). Il rapporto annuale del Global Carbon Project indica in 36,8 miliardi di tonnellate le emissioni di CO2 alla fine del 2019. Mai così alte nella storia. *LifeGate*. <https://www.lifegate.it/emissioni-co2-record-global-carbon-project-2019>

Baruya, P. (2019, 27 novembre). L'economia del carbone: pro e contro. *Sotacarbo Spa*. <https://www.sotacarbo.it/it/2019/11/leconomia-del-carbone-pro-e-contro/>

Belyakov, N. (2019). Chapter Two - Evaluation of energy resources. *Sustainable Power Generation*. Academic Press. 23-61, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817012-0.00011-60>

Bernstein, M., Fonkych, K., Loeb, S., Loughran, D. (2003). Factors Affecting Energy Intensity. *State-Level Changes in Energy Intensity and Their National Implications* (1st ed), 13–18. RAND Corporation. <http://www.jstor.org/stable/10.7249/mr1616doe.11>

Bliss, D. (2022, 4 ottobre). Many scientists see fusion as the future of energy – and they're betting big. *The National Geographic Society*. <https://www.nationalgeographic.co.uk/science-and-technology/2022/10/many-scientists-see-fusion-as-the-future-of-energy-and-theyre-betting-big>

Boeri, M., Longo, A. (2017). The importance of regret minimization in the choice for renewable energy programmes: Evidence from a discrete choice experiment. *Energy Economics*, Volume 63. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988317300713>

Boni, R. (2019, 22 febbraio). Meglio scegliere il Gpl o il metano? *Quattroruote*. https://www.quattroruote.it/news/mercato/2019/02/22/auto_a_gas_meglio_il_gpl_o_il_metano.html

Boschetti, B. L. (2009). Il governo dell'incertezza nella politica energetica: l'energia tra innovazione e sostenibilità ambientale. *Amministrare / a. XXXIX* (n. 2, giugno 2009). 257-280. <https://www.rivisteweb.it/doi/10.1442/29656>

BP (2017). *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/pdf-actualites/bp-statistical-review-of-world-energy-2017-full-report.pdf>

BP (2019). *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2019-full-report.pdf>

BP (2020). *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

BP (2021). *BP Statistical Review of World Energy*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2021-full-report.pdf>

Brook, B. W., Alonso, A., Meneley, D. A., Misak, J., Bles, T., van Erp, J. B. (2014). Why nuclear energy is sustainable and has to be part of the energy mix. *Sustainable Materials and Technologies*, Volumes 1–2. 8-16. <https://doi.org/10.1016/j.susmat.2014.11.001>

Broussard, E. (2021). Uniting countries through fusion research and cooperation. *International Atomic Energy Agency*. <https://www.iaea.org/bulletin/uniting-countries-through-fusion-research-and-cooperation>

Camera dei Deputati (2021). *Governance europea e nazionale su energia e clima* [Documento]. Parlamento italiano. https://www.camera.it/temiap/documentazione/temi/pdf/1144175.pdf?_1661865542866

Carpio-de Los Pinos, A. J., González-García, M. L. N., Pentelhão, L. C., Baptista, J. S. (2021). Zero-Risk Interpretation in the Level of Preventive Action Method Implementation for Health and Safety in Construction Sites. *International journal of environmental research and public health*, 18 (7). 3534. <https://doi.org/10.3390/ijerph18073534>

Carrino, G. (2019, 02 aprile). Stoccaggio gas: come funziona e perché sarà sempre più importante. *RiEnergia*. <https://rienergia.staffettaonline.com/articolo/33268/Stoccaggio-gas:-come-funziona-e-perché-sarà-sempre-più-importante/Carrino>

Chatzis, I., Barbarino, M. (2021). What is Fusion, and Why Is It So Difficult to Achieve? *International Atomic Energy Agency*. <https://www.iaea.org/bulletin/what-is-fusion-and-why-is-it-so-difficult-to-achieve>

Chen, L., Gao, K., Zhang, C., Lang, W. (2019). Chapter 2 - Alternative fuels for IC engines and jet engines and comparison of their gaseous and particulate matter emissions. Editor(s): Abul Kalam Azad, Mohammad Rasul. Woodhead Publishing Series in Energy, *Advanced Biofuels*, Woodhead Publishing. 17-64. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102791-2.00002-7>

Ciccioli P., Ragni, P. (2016). *Modulo Introduttivo 1.1: Manuale didattico su “Risorse rinnovabili e non rinnovabili”*. Institute of Chemical Methodologies of National Research Council IMC-CNR. 3, 7-8. <https://ec.europa.eu/programmes/erasmus-plus/project-result-content/fb043586-1ed5-41c1-984a-5ff33d936b92/IT-Modulo%201.1%20-%20Documento%20Didattico%20-%20IMC.pdf>

Cicia, G., Cembalo, L., Del Giudice, T., Palladino, A. (2012). Fossil energy versus nuclear, wind, solar and agricultural biomass: Insights from an Italian national survey. *Energy Policy*. Volume 42. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421511009074>

'Clean Coal' Technologies, Carbon Capture & Sequestration (2021). *World Nuclear Association*. <https://world-nuclear.org/information-library/energy-and-the-environment/clean-coal-technologies.aspx>

CLM (2018). Il metano in ferrovia: un carburante che merita di essere rivalutato. <https://www.clusterlombardomobilita.it/wp-content/uploads/2018/04/Il-metano-in-ferrovia-V2r.pdf>

Coal Power Impacts (2017, 15 novembre). *UCS*. <https://www.ucsusa.org/resources/coal-power-impacts#:~:text=Coal%20impacts%3A%20air%20pollution&text=They%20include%20m>

mercury%2C%20lead%2C%20sulfur,neurological%20disorders%2C%20and%20premature%20death.

Conca, J. (2015, 11 maggio). When Should A Nuclear Power Plant Be Refueled? *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/jamesconca/2015/05/11/when-should-a-nuclear-power-plant-be-refueled/?sh=6fb595b43d95>

Contu, D., Elshareif, E.E. (2022). Greater acceptability, lower compensations required? The impact of perceived net benefits on willingness to accept nuclear energy projects. *International Journal of Energy Sector Management*. Vol. 16 (2). <https://doi.org/10.1108/IJESM-07-2020-0012>

Contu, D., Strazzera, E. (2022). Testing for saliency-led choice behavior in discrete choice modeling: An application in the context of preferences towards nuclear energy in Italy. *Journal of Choice Modelling*, Volume 44. <https://doi.org/10.1016/j.jocm.2022.100370>

Deemer, B. R., Harrison, J. A., Li, S., Beaulieu, J. J., DelSontro, T., Barros, N., Bezerra-Neto, J. F., Powers, S. M., dos Santos, M. A., Vonk, J. A. (2016). Greenhouse Gas Emissions from Reservoir Water Surfaces: A New Global Synthesis. *BioScience*. Volume 66. Issue 11. 949–964. <https://doi.org/10.1093/biosci/biw117>

Denchak, M. (2022, 1 giugno). Fossil Fuels: The Dirty Facts. *Natural Resources Defense Council*. <https://www.nrdc.org/stories/fossil-fuels-dirty-facts#sec-disadvantages>

Denchak, M. (2022, 23 maggio). Are the Effects of Global Warming Really that Bad? *Natural Resources Defense Council*. <https://www.nrdc.org/stories/are-effects-global-warming-really-bad>

Doble, M., Kruthiventi, A.K. (2007). CHAPTER 10 - Conclusions and Future Trends. Editor(s): Mukesh Doble, Anil Kumar Kruthiventi. *Green Chemistry and Engineering*, Academic Press. 297-312. <https://doi.org/10.1016/B978-012372532-5/50011-0>

Dodgson, M., Gann, D. (2020, 11 dicembre). What is fusion energy, and what will it take for it to go mainstream? *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2020/12/fusion-experiments/>

DOE (2015). Chapter 7: Advancing Systems and Technologies to Produce Cleaner Fuels. Editor(s): US Department of Energy. *Quadrennial Technology Review 2015*. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2016/05/f32/Ch.7-SI-Oil-and-Gas-Technologies.pdf>

DOE (2015). *Natural Gas Infrastructure Implications of Increased Demand from the Electric Power Sector*. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/02/f19/DOE%20Report%20Natural%20Gas%20Infrastructure%20V_02-02.pdf

Dunham, K. (1974). Non-renewable mineral resources. *Resources Policy*, Volume 1, Issue 1. 3-13. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(74\)90003-8](https://doi.org/10.1016/0301-4207(74)90003-8)

Dutzik, T (2011, 29 marzo). Do We Really Need Nuclear Power for “Baseload” Electricity? *Frontier Group*. <https://frontiergroup.org/articles/do-we-really-need-nuclear-power-baseload-electricity/>

Eberhart, D. (2020, 3 agosto). It’s Harder Than You Think to Stop Using Fossil Fuels. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/daneberhart/2020/08/03/its-harder-than-you-think-to-stop-using-fossil-fuels/?sh=4f33cb89202c>

Edomah, N. (2018). Economics of Energy Supply. Reference Module in *Earth Systems and Environmental Sciences*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11713-0>

EIA (2022, 1 luglio). *Oil and petroleum products explained*. <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/use-of-oil.php>

EIA (2022, 19 aprile). *Oil and petroleum products explained*. <https://www.eia.gov/energyexplained/oil-and-petroleum-products/>

Ek, K., Persson, L. (2014). Wind farms — where and how to place them? A choice experiment approach to measure consumer preferences for characteristics of wind farm establishments in Sweden. *Ecological Economics*, 105. 193–203. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0921800914001815>

El Bassam, N. (2021). Chapter Two - Restructuring future energy generation and supply. Editor(s): Nasir El Bassam. *Distributed Renewable Energies for Off-Grid Communities* (Second Edition), Elsevier. 27-37. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821605-7.00029-5>

ENEA (2019). *Costo livellato dell'elettricità (Levelized Cost of Electricity)*. <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-c/costo-livellato-dell-elettricit.html>

ENEA (2019). Glossario: *Effetto rimbalzo (Rebound Effect)*. <https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-e/effetto-rimbalzo.html>

ENI (2011). *Gas naturale*. https://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2011/02/pdf_gas.pdf

ENI (2011). *Petrolio*. https://www.eniscuola.net/wp-content/uploads/2011/02/pdf_petrolio.pdf

Entler, S., Horacek, J., Dlouhy, T., Dostál, V. (2018). Approximation of the economy of fusion energy. *Energy*, 152. 489-497. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.130>

Environmental Impacts of Natural Gas (2014, 19 giugno). UCS. <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-natural-gas>

Environmental Impacts of Natural Gas (2014, 19 giugno). UCS. <https://www.ucsusa.org/resources/environmental-impacts-natural-gas>

EPA (2022). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm>

EPA (2022, 18 gennaio). *Transportation of Radioactive Material*. <https://www.epa.gov/radtown/transportation-radioactive-material>

European Fusion Development Agreement (2007). *Energy, Powering Your World*. https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/Archive/wp-content/uploads/2011/11/EPYW_it.pdf

European Parliamentary Research Service (2015). *Understanding energy efficiency* (PE 568.361).

[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI\(2015\)568361_EN.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2015/568361/EPRS_BRI(2015)568361_EN.pdf)

Fait, L., Groh, E.D., Wetzel, H., 2022. “I take the green one”: The choice of regional green electricity contracts in the light of regional and environmental identity. *Energy Policy*, Volume 163. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421522000568>

Falduto, C., Arbinolo, M. (2021, 2 novembre). COP: Breve guida alle conferenze sul clima, da Kyoto a oggi. *Duegradi*. <https://www.duegradi.eu/news/conferenze-clima/>

FAO. 2020. *Emissions due to agriculture. Global, regional and country trends 2000–2018*. FAOSTAT Analytical Brief Series No 18. Rome. <https://www.fao.org/3/cb3808en/cb3808en.pdf>

Fountain, H. (2022, 13 dicembre). Can Fusion Solve the Climate Crisis? *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2022/12/13/climate/fusion-climate-change.html>

Friedlingstein, P., et. Al (2019). Global Carbon Budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data*, 11, 1783-1838. <https://doi.org/10.5194/essd-11-1783-2019>

Galindo, A. (2022, 15 novembre). What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power. *International Atomic Energy Agency*. <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>

Ge, M., Friederich, J., Vigna, L. (2020, 6 febbraio). 4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors. *World Resources Institute*. <https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>

Gillingham, K., Rapson, D., Wagner, G. (2014). *The Rebound Effect and Energy Efficiency Policy*. Fondazione Eni Enrico Mattei (FEEM). 1-3. <http://www.jstor.org/stable/resrep01115>

Gowrisankaran, G., Reynolds S., Samano, M. (2016). *Intermittency and the Value of Renewable Energy*. *Journal of Political Economy*, 124, (4). 1187 – 1234. <https://www.journals.uchicago.edu/doi/abs/10.1086/686733>

Greene W. H. (2008). *Econometric analysis* (6th ed.). Prentice Hall. <https://fdocument.org/document/greene-econometric-analysis-6th-ed-2008fm-greene-econometric-analysis-6th.html>

Greene, W.H., Hensher, D.A. (2003). A latent class model for discrete choice analysis: contrasts with mixed logit. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 37, Issue 8. 681-698. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261502000462>

Greene, W.H., Hensher, D.A. (2003). A latent class model for discrete choice analysis: contrasts with mixed logit. *Transportation Research Part B: Methodological*, Vol 37 (8). 681-698. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261502000462>

Greenhouse Gas Protocol (2014). *Global Warming Potential Values*. https://www.ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/Global-Warming-Potential-Values%20%28Feb%2016%202016%29_1.pdf

Grimes A., Denne, T., Howden-Chapman, P., Arnold R., Telfar-Barnard, L., Preval, N., Young, C. (2011). *Cost Benefit Analysis of the Warm Up New Zealand: Heat Smart Program*. <https://www.aucklandcouncil.govt.nz/plans-projects-policies-reports-bylaws/our-plans-strategies/unitary-plan/history-unitary-plan/documentssection32reportproposedaup/appendix-3-8-5.pdf>

Gürsan, C., de Gooyert, V. (2021). The systemic impact of a transition fuel: Does natural gas help or hinder the energy transition? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 138. 1,4. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110552>

Halper, E. (2022, 5 settembre). See how electric cars are changing this South American desert. *The Washington Post*. <https://www.washingtonpost.com/photography/interactive/2022/lithium-mining-electric-cars-chile/>

Hartley, J.N., Gore, B.F., Young, J.R. (1978). Potential lithium requirements for fusion power plants. *Energy*, Volume 3, Issue 3. 337-346. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360544278900300>

Hendler, R. (1975). Lancaster's New Approach to Consumer Demand and Its Limitations. *The American Economic Review*, 65(1). 194–199. <http://www.jstor.org/stable/1806408>

Hensher, D.A. (2010). Hypothetical bias, choice experiments and willingness to pay. *Transportation Research Part B: Methodological*, Volume 44, Issue 6. 735-752. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261509001477>

Horlick-Jones, T., Prades, A., Espluga, J. (2012). Investigating the degree of “stigma” associated with nuclear energy technologies: A cross-cultural examination of the case of fusion power. *Public Understanding of Science*, 21(5). 514-533. <https://doi.org/10.1177/0963662510371630>

How Coal Works (2017, 15 dicembre). UCS. <https://www.ucsusa.org/resources/how-coal-works>

Hudson, K. (2017, 21 novembre). Hydropower is NOT Clean Energy: Dams and Reservoirs are Major Drivers of Climate Change. *Waterkeeper Alliance*. <https://waterkeeper.org/news/hydropower-is-not-clean-energy/>

Huh, S.Y., Woo, J., Lee., C.Y. (2019). What Do Potential Residents Really Want When Hosting a Nuclear Power Plant? An Empirical Study of Economic Incentives in South Korea. *Energies* 12, no. 7. 1199. <https://doi.org/10.3390/en12071199>

IAEA (2019). *IAEA Factsheet: Nuclear Science & Technology*. <https://www.iaea.org/sites/default/files/19/09/harnessing-energy-from-nuclear-fusion.pdf>

IEA (2017). *World Energy Outlook 2017*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2017>

IEA (2019). *Multiple Benefits of Energy Efficiency*. <https://www.iea.org/reports/multiple-benefits-of-energy-efficiency>

IEA (2019). *The Role of Gas in Today's Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-gas-in-todays-energy-transitions>

IEA (2020). *Global Energy Review 2019*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2019>

IEA (2021). *Coal 2021*. <https://www.iea.org/reports/coal-2021>

IEA (2021). *Greenhouse Gas Emissions from Energy Data Explorer*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/greenhouse-gas-emissions-from-energy-data-explorer>

IEA (2021). *Net Zero by 2050*. <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>

IEA (2021). *The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions*. <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>

IEA (2021). *Renewables 2021*. <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>

IEA (2021, 17 novembre). *Press release: Global energy efficiency progress is recovering – but not quickly enough to meet international climate goals*. <https://www.iea.org/news/global-energy-efficiency-progress-is-recovering-but-not-quickly-enough-to-meet-international-climate-goals>

IEA (2022) *Gas*. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/gas>

IEA (2022). *Average annual growth rates of world renewables supply, 1990-2019*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/average-annual-growth-rates-of-world-renewables-supply-1990-2019>

IEA (2022). *Global Energy Review: CO2 Emissions in 2021*. <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-co2-emissions-in-2021-2>

IEA (2022). *Renewables*. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/renewables>

IEA (2022). *Nuclear Electricity*. <https://www.iea.org/reports/nuclear-electricity>

IEA (2022). *Renewables*. <https://www.iea.org/reports/renewables>

IEA (2022). *Nuclear*. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies/nuclear>

IEA ETSAP (2010). *Gas-Fired Power*. https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E02-gas_fired_power-GS-AD-gct.pdf

IEA, IRENA, UNSD, WB, WHO (2019) *Tracking SDG 7: The Energy Progress Report 2019*. <https://trackingsdg7.esmap.org/data/files/download-documents/2019-Tracking%20SDG7-Full%20Report.pdf>

IEA, OECD, EUROSTAT (2004). *Energy Statistics Manual*. https://ec.europa.eu/eurostat/ramon/statmanuals/files/Energy_statistics_manual_2004_EN.pdf

Independent Petroleum Association of America (IPAA) (2001): *Understanding the World Petroleum Association of America Market*. <http://www.ipaa.org/wp-content/uploads/2016/12/2001-12-Understanding-World-Petroleum.pdf>

IPCC (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>

IPCC (2018) *Annex I: Glossary* [Matthews, J.B.R. (ed.)]. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 541-562. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.008>.

IPCC (2018). *Summary for Policymakers*. In: *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. 3-24. <https://doi.org/10.1017/9781009157940.001>.

IPCC (2022). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M.

Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_SummaryForPolicymakers.pdf

IREN (2022, 26 giugno). *F come fonti energetiche: quali sono e in cosa differiscono*.
<https://www.gruppoiren.it/it/everyday/abcircular/2022/fonti-energetiche-rinnovabili-cosa-sono.html>

IRENA (2017). *Electricity Storage and Renewables: Costs and Markets to 2030*.
<https://www.irena.org/publications/2017/Oct/Electricity-storage-and-renewables-costs-and-markets>

Irfan, U. (2022, 6 gennaio). Fusion energy is a reason to be excited about the future. *Vox*.
<https://www.vox.com/22801265/fusion-energy-electricity-power-climate-change-research-iter>

Is Solar Energy Low Maintenance? (2018, 9 ottobre). *Amplussolar*.
<https://amplussolar.com/blogs/is-solar-energy-low-maintenance>

Iurshina, D., Karpov, N., Kirkegaard, M., Semenov, E. (2019, 20 giugno). Why nuclear power plants cost so much—and what can be done about it. *Bulletin of the Atomic Scientists*.
<https://thebulletin.org/2019/06/why-nuclear-power-plants-cost-so-much-and-what-can-be-done-about-it/>

Jawerth, N. (2018, giugno). *Ensuring safe and secure passage for the nuclear industry's vital natural resource*. IAEA Bulletin.
<https://www.iaea.org/sites/default/files/publications/magazines/bulletin/bull59-2/5921819.pdf>

Johnson, F.R., Yang, J., Reed, S.D. (2019). The Internal Validity of Discrete Choice Experiment Data: A Testing Tool for Quantitative Assessments. *Value in Health*, Volume 22, Issue 2, 157-160.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1098301518332339>

Kim, H.J., Lim, S.Y., Yoo., S.H. (2020). The South Korean public's evaluation of the mix of power generation sources: A choice experiment study. *Energy & Environment*, 31(7). 1181– 1190. <https://doi.org/10.1177/0958305X19882384>

Knapp, L., Ladenburg, J. (2015). How Spatial Relationships Influence Economic Preferences for Wind Power—A Review. *Energies*, 8(6). 6177–6201. <http://dx.doi.org/10.3390/en8066177>

Kobayashi-Solomon, E. (2022, 18 agosto). We Have an Energy Storage Problem. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/erikkobayashisolomon/2022/08/18/we-have-an-energy-storage-problem/?sh=2f9ae1ee1681>

Koyama, K. (2017). *The Role and Future of Fossil Fuel*. IEEJ Energy Journal Special Issue October 2017. 80-83. <https://eneken.ieej.or.jp/data/7647.pdf>

La prima crisi energetica del dopoguerra (2022, 17 marzo). *Il Post*. <https://www.ilpost.it/2022/03/17/austerity-1973/>

Lalude, G. (2015). Importance of Oil to the Global Community. *Global Journal of Human-Social Science: F, Political Science*, Volume 15 Issue 1 Version 1.0. 18-19. https://globaljournals.org/GJHSS_Volume15/3-Importance-of-Oil.pdf

Lancsar, E., Fiebig, D.G. Hole, A.R. (2017). Discrete Choice Experiments: A Guide to Model Specification, Estimation and Software. *PharmacoEconomics* 35. 697–716. <https://doi.org/10.1007/s40273-017-0506-4>

Lazard (2021). Levelized Cost of Energy, Levelized Cost of Storage, and Levelized Cost of Hydrogen. <https://www.lazard.com/perspective/levelized-cost-of-energy-levelized-cost-of-storage-and-levelized-cost-of-hydrogen/>

Lee, J., Moon, H., Lee, J. (2021). Consumers' heterogeneous preferences toward the renewable portfolio standard policy: An evaluation of Korea's energy transition policy. *Energy & Environment*, 32(4). 648–667. <https://doi.org/10.1177/0958305X20949467>

Lelieveld, J., Kunkel, D., and Lawrence, M. G. (2012). Global risk of radioactive fallout after major nuclear reactor accidents. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 12. 4245–4258. <https://doi.org/10.5194/acp-12-4245-2012>

Lettig, D. (2021, 7 settembre). Trasporti, l'industria navale propone una tassa globale sulle emissioni di CO2 del settore. *Euractiv*. <https://euractiv.it/section/energia-e-ambiente/news/trasporti-lindustria-navale-propone-una-tassa-globale-sulle-emissioni-di-co2-del-settore/>

Lew, D.K., Whitehead, J. (2020). Attribute Non-attendance as an Information Processing Strategy in Stated Preference Choice Experiments: Origins, Current Practices, and Future Directions. *Marine Resource Economics*, 35 (3). 285-317. https://econpapers.repec.org/article/ucpmresec/doi_3a10.1086_2f709440.htm

Lieberman, B. (2016, 7 luglio). Pros and cons: Promise, pitfalls of natural gas. *Yale Climate Connections*. <https://yaleclimateconnections.org/2016/07/pros-and-cons-the-promise-and-pitfalls-of-natural-gas/>

Litman, T. (2013). Full Cost Analysis of Petroleum Consumption. *Transport Beyond Oil*. 51-69. https://www.vtpi.org/Beyond_Oil_Litman.pdf

Lois, E., Keating, E.L., Gupta, A.K. (2003). Fuels. Editor(s): Robert A. Meyers. *Encyclopedia of Physical Science and Technology* (Third Edition). Academic Press. 275-314. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00268-4>

Lutz, A. (2022, 4 novembre). Types of Solar Panels for Homes (2022 Guide). *Architectural Digest*. <https://www.architecturaldigest.com/reviews/home-improvement/types-of-solar-panels>

MacDonald, J. (2019, 6 maggio). The Downside to Renewable Energy. *JSTOR Daily*. <https://daily.jstor.org/the-downside-to-renewable-energy/>

Maggio, G., Cacciola, G. (2012). When will oil, natural gas, and coal peak? *Fuel*, Volume 98. 111-123. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2012.03.021>

Mahieu, P.A., Andersson, H., Beaumais, O., Crastes, R., Wolff, F.C. (2014). *Is choice experiment becoming more popular than contingent valuation? A systematic review in agriculture, environment and health*. FAERE Working Paper, 2014.12. 1-27. http://faere.fr/pub/WorkingPapers/Mahieu_Andersson_Beaumais_Crastes_Wolff_FAERE_WP2014.12.pdf

Marti, L., Puertas, R., (2022). Sustainable energy development analysis: Energy Trilemma. *Sustainable Technology and Entrepreneurship*, Volume 1, Issue 1, January–April 2022, 100007. 3. <https://doi.org/10.1016/j.stae.2022.100007>

- Mathew, M.D. (2022). Nuclear energy: A pathway towards mitigation of global warming. *Progress in Nuclear Energy*, Volume 143. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0149197021004340>.
- McFadden, D. (1973). Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. *Frontiers in econometrics*. 105-142. <https://eml.berkeley.edu/reprints/mcfadden/zarembka.pdf>
- McKenna, R. (2018). The double-edged sword of decentralized energy autonomy. *Energy Policy*, 113. 747–750. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.033>
- MET Group (2020, 30 settembre). *Natural Gas Environmental Impact: Problems and Benefits*. <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/natural-gas-environmental-impact>
- Miller, B.G. (2005). CHAPTER 1 - Introduction to Coal. Editor(s): Bruce G. Miller. *Sustainable World, Coal Energy Systems*. Academic Press. 1-27. <https://doi.org/10.1016/B978-012497451-7/50001-2>
- Ministero degli Affari Esteri e della Cooperazione Internazionale (2018). *Linee guida per progetti di cooperazione in ambito “Energia e Sviluppo”*. https://www.esteri.it/mae/resource/doc/2018/02/linee_guida_energia_per_cics_bis.pdf
- Miyanaga, S. (2021, 2 febbraio). What is ‘the energy trilemma’ and what do we need to do about it? *Spectra (MHI)*. <https://spectra.mhi.com/what-is-the-energy-trilemma-and-what-do-we-need-to-do-about-it>
- Murakami, K., Ida, T., Tanaka, M., Friedman, L. (2015). Consumers' willingness to pay for renewable and nuclear energy: A comparative analysis between the US and Japan. *Energy Economics*, Volume 50. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140988315001541>
- Nakai, M., Okubo, T., Kikuchi, Y. (2018). A socio-technical analysis of consumer preferences about energy systems applying a simulation-based approach: A case study of the Tokyo area. *Energy Research & Social Science*, Volume 46. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214629618305887>

Nappi, L. (2020, 09 gennaio). Crociere, avanti tutta con il GNL - Mediterraneo, dove rifornire le navi? *Corriere Marittimo*. <https://www.corrieremarittimo.it/cruise-ferries/crociere-avanti-tutta-con-il-gnl-mediterraneo-dove-rifornire-le-navi/>

NCC (2015). *Coal = Reliable Energy*. <https://www.nationalcoalcouncil.org/Documents/Energy-Education/4-Coal-Reliable-Energy-Final.pdf>

Neubacher, A. (2012, 18 gennaio). Re-Evaluating Germany's Blind Faith in the Sun. *Der Spiegel*. <https://www.spiegel.de/international/germany/solar-subsidy-sinkhole-re-evaluating-germany-s-blind-faith-in-the-sun-a-809439.html>

NOAA (2022). *Carbon dioxide now more than 50% higher than pre-industrial levels*. <https://www.noaa.gov/news-release/carbon-dioxide-now-more-than-50-higher-than-pre-industrial-levels>

Nunez, C. (2019, 28 febbraio). What is Acid Rain? *National Geographic Society*. <https://www.nationalgeographic.com/environment/article/acid-rain>

Obbekær, M. (2019, 1 dicembre). How much water is used to make the world's batteries? *Danwatch*. <https://danwatch.dk/en/undersogelse/how-much-water-is-used-to-make-the-worlds-batteries/>

ONU (2008, 1 gennaio). *UNDP (United Nations Development Programme). 2008. Access to Energy and Human Development*. <https://hdr.undp.org/system/files/documents//gayeamiepdf.pdf>

ONU (2015, 21 ottobre). Risoluzione adottata dall'Assemblea Generale il 25 settembre 2015 (A/RES/70/1). <https://unric.org/it/wp-content/uploads/sites/3/2019/11/Agenda-2030-Onu-italia.pdf>

Øvergaard, S. (2008). *Issue paper: Definition of primary and secondary energy. Prepared as input to Chapter 3: Standard International Energy Classification (SIEC) in the International Recommendation on Energy Statistics (IRES)*. Statistics Norway. 2-5. https://unstats.un.org/unsd/envaccounting/londongroup/meeting13/LG13_12a.pdf

Owen, A. D. (2001). Energy Policy. In Encyclopedia of Life Support Systems (Ed). *Energy Policy*. 1-32. <https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E3-21.pdf>

Palmer, B. (2021, 15 novembre). Natural Gas 101. *Natural Resources Defense Council*. <https://www.nrdc.org/stories/natural-gas-101#problems>

Parkins, W. E. (1978). Engineering Limitations of Fusion Power Plants. *Science, Vol 199, Issue 4336*. 1403-1408. <https://www.science.org/doi/10.1126/science.199.4336.1403>

Peterson, T.R., Stephens, J.C. Wilson, E.J. (2015) Public perception of and engagement with emerging low-carbon energy technologies: A literature review. *MRS Energy & Sustainability* 2(11). <https://doi.org/10.1557/mre.2015.12>

Pitt, I. (2018, maggio). Expert Insight: What is the optimal energy mix? *Energy Council*. <https://energycouncil.com/articles/optimal-energy-mix/>

Plum, C., Olschewski, R., Jobin, M., van Vliet, O. (2019). Public preferences for the Swiss electricity system after the nuclear phase-out: A choice experiment. *Energy Policy*, Volume 130. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421519302277>

Prades, A., Horlick-Jones, T., Oltra, C., Navajas, J. (2009). Cross-Cultural Comparative Analysis of Lay and Stakeholder Reasoning about Fusion Energy in Spain and the UK. *EFDA WP08-SER-AWF*. 1-61. <https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21262446>

R. Jones, C.R., Oltra, C., Prades, A. (2021). Predicting attitudes towards fusion energy in Europe: Results of a cross-national public survey in Austria, Finland, Spain and the UK. *Energy Research & Social Science*, Volume 75. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2021.102028>

Ramanathan, V., Molina, M.J., Zaelke, D., Borgford-Parnell, N., Xu, Y., Alex, K., Auffhammer, M., Bledsoe, P., Collins, W., Croes, B., Forman, F., Gustafsson, Ö, Haines, A., Harnish, R., Jacobson, M.Z., Kang, S., Lawrence, M., Leloup, D., Lenton, T., Morehouse, T., Munk, W., Piccolotti, R., Prather, K., Raga, G., Rignot, E., Shindell, D., Singh, A.K., Steiner, A., Thiemens, M., Titley, D.W., Tucker, M.E., Tripathi, S., Victor, D. (2017). Well Under 2 Degrees Celsius: Fast Action Policies to Protect People and the Planet from Extreme Climate Change. *The Committee to Prevent Extreme Climate Change (CPECC)*. <https://www.igsd.org/wp-content/uploads/2017/09/Well-Under-2-Degrees-Celsius-Report-2017.pdf>

Ritchie, H., Rosado, p., Roser, M. (2022). Energy. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/nuclear-energy>

Ritchie, H., Roser, M., Rosado, P. (2020). CO₂ and Greenhouse Gas Emissions. *OurWorldInData.org*. <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions>

Ro, C. (2019, 26 novembre). The Staggering Timescales of Nuclear Waste Disposal. *Forbes*. <https://www.forbes.com/sites/christinero/2019/11/26/the-staggering-timescales-of-nuclear-waste-disposal/?sh=124fdec529cf>

Rocchi, L. (2009). Choice experiments ed eterogeneità delle preferenze per i bacini ad uso plurimo: Un'applicazione al lago di Montedoglio. *Aestimum*, 54. <http://dx.doi.org/10.13128/Aestimum-3277>

Rodrigue, J.P (2022). 4.1 – Transportation and Energy: World Annual Oil Production and Peak Oil. *The Geography of Transport Systems*. <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-energy/peak-oil/>

Rose, T., Sweeting, T. (2016) How safe is nuclear power? A statistical study suggests less than expected. *Bulletin of the Atomic Scientists*, Vol. 72, No. 2. 112–115 <http://dx.doi.org/10.1080/00963402.2016.1145910>

Roser, M (2020, 1 dicembre). Why did renewables become so cheap so fast? *Our World in data*. <https://ourworldindata.org/cheap-renewables-growth>

Roth, M., Eiter, S., Rohner, S., Kruse, A., Schmitz, S., Frantal, B., Centeri, C., Frolova, M., Buchecker, M., Stober, D., Karan, I., van der Horst, D. (2018). *Renewable Energy and Landscape Quality*. Jovis. 1-9. <https://pearlproject.org/wp-content/uploads/2018/10/Renewable-Energy-and-Landscape-Quality.pdf>

Rutledge, K., McDaniel, M., Teng, S., Hall, H., Ramroop, T., Sprout, E., Hunt, J., Boudreau, D., Costa, H. (2022, 22 ottobre). Nuclear Energy. *The National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/nuclear-energy>

Salvalaggio, C. (2022, 16 dicembre). Usa annunciano la 'svolta storica' sulla fusione nucleare. ANSA. https://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/energia/2022/12/13/usa-annunciano-la-svolta-storica-sulla-fusione-nucleare-diretta-alle-1600_a80bdadb-37cd-4b94-a869-0f839a3a9fa5.html

Samuel Gyamfi, S., Derkyi, N. S. A., Asuamah, E. Y. (2018). Chapter 7 - The Potential and the Economics of Hydropower Investment in West Africa. Editor(s): Amos Kabo-Bah, Chukwuemeka J. Diji. *Sustainable Hydropower in West Africa*. 95-107. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813016-2.00007-1>

Schlosberg, M., Hart, P. (2021, 20 luglio). Top 5 Reasons Carbon Capture and Storage (CCS) is bogus. *Food & Water Watch*. <https://www.foodandwaterwatch.org/2021/07/20/top-5-reasons-carbon-capture-and-storage-ccs-is-bogus/>

Schneider, Y., Zewifel, P. (2013). Spatial Effects in Willingness to Pay for Avoiding Nuclear Risks. *Swiss Journal of Economics and Statistics*, Volume 149. <https://www.econstor.eu/handle/10419/186029>

Schwartz, M. (2019, 20 dicembre). Q&A: Stanford expert explains why we continue burning coal for energy. *Stanford Precourt Institute for Energy*. <https://energy.stanford.edu/news/qa-stanford-expert-explains-why-we-continue-burning-coal-energy>

Schwarz, N. (2011), "Feelings-as-Information," in *Handbook of Theories of Social Psychology*, Vol. 1, ed. Paul A. M. Vab Lange, Arie W. Kruglanski and E. Tory Higgins, Los Angeles, CA: Sage. 289-308. https://dornsife.usc.edu/assets/sites/780/docs/schwarz_feelings-as-information_7jan10.pdf

Sekera, J., Lichtenberger, A. (2020) *Assessing Carbon Capture: Public Policy, Science, and Societal Need*. *Biophys Econ Sust* 5, 14. <https://doi.org/10.1007/s41247-020-00080-5>

Selley, R.C. (2003). Petroleum Geology. Editor(s): Robert A. Meyers. *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Third Edition)*. 729-740. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00555-X>

Service, R.F. (2019, 19 settembre). Can the world make the chemicals it needs without oil? *Science*. <https://www.science.org/content/article/can-world-make-chemicals-it-needs-without-oil>

Sharma, N., Smeets. B., Tryggstad, C. (2019, 24 aprile). The decoupling of GDP and energy growth: A CEO guide. *McKinsey Quarterly*.

<https://www.mckinsey.com/industries/electric-power-and-natural-gas/our-insights/the-decoupling-of-gdp-and-energy-growth-a-ceo-guide>

Shine, I (2022, 20 luglio). The world needs 2 billion electric vehicles to get to net zero. But is there enough lithium to make all the batteries? *World Economic Forum*. <https://www.weforum.org/agenda/2022/07/electric-vehicles-world-enough-lithium-resources/>

Simons, S., Schmitt, J., Tom, B., Bao, H., Pettinato, B., Pechulis, M. (2021). Chapter 10 - Advanced concepts. Editor(s): Klaus Brun, Timothy Allison, Richard Dennis. *Thermal, Mechanical, and Hybrid Chemical Energy Storage Systems*. 569-596. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819892-6.00010-1>

Singhvi, S. (2022, 2 maggio). Energy storage is key to unlocking renewable power's full potential. *World Business Council for Sustainable Development*. <https://economictimes.indiatimes.com/industry/renewables/view-energy-storage-is-key-to-unlocking-renewable-powers-full-potential/articleshow/91256000.cms>

Sloss, L., Loria, E. (2020, 20 aprile). Il trilemma dell'energia: domande e risposte. *Sotacarbo SpA*. <https://www.sotacarbo.it/it/2020/04/il-trilemma-dellenergia-domande-e-risposte/#:~:text=La%20sostenibilit%C3%A0%20ambientale%20%C3%A8%20il,ambiente%20e%20preservando%20le%20risorse.>

SNAM (2022, 24 maggio). *Utilizzo del Gas Naturale*. https://www.snam.it/it/sostenibilita/responsabilita_verso_tutti/utilizzo_del_gas_naturale.html

Staffell, I. (2011). *The Energy and Fuel Data Sheet*. University of Birmingham, UK. https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf

Stauffer, E., Dolan, J.A., Newman, R (2008). CHAPTER 7 - Flammable and Combustible Liquids. Editor(s): Eric Stauffer, Julia A. Dolan, Reta Newman. *Fire Debris Analysis*. Academic Press. 199-233. <https://doi.org/10.1016/B978-012663971-1.50011-7>

Stern, D. I. (2010). *The Role of Energy in Economic Growth*, USAEE-IAEE WP 10-055, 3, 5, 10, 43. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1878863

Stevens, P. (2018). Chapter 4: The Role of Oil and Gas in the Economic Development of the Global Economy. Editor(s): Addison, T. and Roe, A. *Extractive Industries: The Management of Resources as a Driver of Sustainable Development*. Oxford Academic, Oxford. <https://doi.org/10.1093/oso/9780198817369.003.0004>

Stewart, M.I. (2014). Chapter Nine - Gas Sweetening. Editor(s): Maurice I. Stewart. *Surface Production Operations* (Third Edition). Gulf Professional Publishing, Volume 2, 2014. 433-539. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-382207-9.00009-3>

Street, D.J., Burgess, L., Louviere, J.J. (2005). Quick and easy choice sets: Constructing optimal and nearly optimal stated choice experiments. *International Journal of Research in Marketing*, 22, 459–470. https://www.academia.edu/17773319/Quick_and_easy_choice_sets_Constructing_optimal_and_nearly_optimal_stated_choice_experiments

Tabi, A., Wüstenhagen, R. (2017). Keep it local and fish-friendly: Social acceptance of hydropower projects in Switzerland. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 68, Part 1, 763-773. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032116306542>

Terris-Prestholt, F., Neke, N., Grund, J.M. et al. (2019) Using discrete choice experiments to inform the design of complex interventions. *Trials* 20, 157. <https://trialsjournal.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13063-019-3186-x>

Thejo Kalyani, N., Dhoble, S. J. (2021). Chapter 19 - Energy materials: Applications and propelling opportunities. Editor(s): S.J. Dhoble, N.Thejo Kalyani, B. Vengadaesvaran, Abdul Kariem Arof. *Energy Materials*. 567-580. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823710-6.00011-X>

Train, K. (2009). *Discrete Choice Methods with Simulation* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/core/books/discrete-choice-methods-with-simulation/49CABD00F3DDDA088A8FBFAAAD7E9546>

Tumuluru, J.S., Hess, J., Boardman, R., Wright, C., Westover, T. (2012). Formulation, Pretreatment, and Densification Options to Improve Biomass Specifications for Co-Firing High Percentages with Coal. *Industrial Biotechnology*. 8, 113-132. <https://www.liebertpub.com/doi/full/10.1089/ind.2012.0004>

Turgeon, A., Morse, E. (2022, 20 maggio). Natural gas. *National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/natural-gas>

Turgeon, A., Morse, E. (2022, 27 luglio). Petroleum. *National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/petroleum>

Turgeon, A., Morse, E. (2022, 28 luglio). Solar Energy. *National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/solar-energy>

Turgeon, A., Morse, E. (2022, 29 luglio). Coal. *National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/coal>

Türkoğlu1, S. P., Kardoğan, P. S. O. (2018). The Role and Importance of Energy Efficiency for Sustainable Development of the Countries. Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017). ISBS 2017. *Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 7. Springer. 1-3. https://www.researchgate.net/publication/324110795_The_Role_and_Importance_of_Energy_Efficiency_for_Sustainable_Development_of_the_Countries

Turner, J. (2021, 31 agosto). What can we learn from the role of coal in the Industrial Revolution? *Economics Observatory*. <https://www.economicsobservatory.com/what-can-we-learn-from-the-role-of-coal-in-the-industrial-revolution>

UFAM (2018). L'Accordo di Parigi sul clima. https://www.bafu.admin.ch/bafu/it/home/temi/clima/info-specialisti/clima--affari-internazionali/l_accordo-di-parigi-sul-clima.html

UNECE (2021). *Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options*. <https://unece.org/sites/default/files/2021-10/LCA-2.pdf>

UNFCCC (2008). *Kyoto Protocol Reference Manual on Accounting of Emissions and Assigned Amounts*. https://unfccc.int/sites/default/files/08_unfccc_kp_ref_manual.pdf

Ungemach, C., Camilleri, A., Johnson, E.J., Larrick, R.P., Weber, E. (2017). Translated Attributes as Choice Architecture: Aligning Objectives and Choices Through Decision Signposts. *Management Science, Forthcoming, Columbia Business School Research Paper No. 17-30*. https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=2921515

Unwin, J. (2019, 28 maggio). Nuclear power: The pros and cons of the energy source. *Power Technology*. <https://www.power-technology.com/features/nuclear-power-pros-cons/>

Uranium Supply is Not a Significant Constraint to Using Nuclear Energy for Climate Mitigation (2022, gennaio). Nuclear Innovation Alliance. <https://nuclearinnovationalliance.org/uranium-supply-not-significant-constraint-using-nuclear-energy-climate-mitigation>

Uses of Natural Gas (2014, 19 giugno). UCS. <https://www.ucsusa.org/resources/uses-natural-gas#:~:text=Industrial%20and%20other%20uses,for%20producing%20plastics%20and%20chemicals.>

Vallero, D.A. (2019). Air pollution biogeochemistry. In *Air Pollution Calculations. Quantifying Pollutant Formation, Transport, Transformation, Fate and Risks*. Elsevier, 2019. 175-206. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814934-8.00008-9>.

van Opheusden, B., Acerbi, L., Ma, W.J. (2020). Unbiased and efficient log-likelihood estimation with inverse binomial sampling. *PLoS Computational Biology* 16(12). <https://doi.org/10.1371/journal.pcbi.1008483>

van Zalk, J., Behrens, P. (2018). The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*. Volume 123. 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.023>

Wagoner, S. (2017, 1 maggio). 4 Reasons Why Hydropower is the Guardian of the Grid. *Office of Energy Efficiency & Renewable Energy*. <https://www.energy.gov/eere/articles/4-reasons-why-hydropower-guardian-grid>

Wald, M. (2020, 1 aprile). Why Refuel a Nuclear Reactor Now? *Nuclear Energy Institute*. <https://www.nei.org/news/2020/why-refuel-plant-during-pandemic>

Wang, Y., Wang, Z., Wang, Z., Li, X., Pang, X., Wang, S. (2021). Application of Discrete Choice Experiment in Health Care: A Bibliometric Analysis. *Frontiers in Public Health*, Vol. 9. 1-10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpubh.2021.673698>

Wani, S.A., Asif, M., Lone, S., Dar, S., Asif, S. (2020). Global warming and its impact on environment. *International Journal of Scientific Research*, Vol. 4, Issue, 4. 490-494.

[https://www.researchgate.net/publication/342834510 GLOBAL WARMING AND ITS IMPACT ON ENVIRONMENT](https://www.researchgate.net/publication/342834510)

WEC (2015). World Energy Trilemma: Priority actions on climate change and how to balance the trilemma. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/2015-World-Energy-Trilemma-Priority-actions-on-climate-change-and-how-to-balance-the-trilemma.pdf>

WEC (2019). *World Energy Trilemma Index 2019*. <https://www.worldenergy.org/assets/downloads/WETrilemma 2019 Full Report v4 pages.pdf>

White, A., Krol, A. (2020, 14 ottobre). Nuclear Energy. *Massachusetts Institute of Technology Climate Portal*. <https://climate.mit.edu/explainers/nuclear-energy>

Wihbey, J. (2015, 27 maggio). Pros and cons of fracking: 5 key issues. *Yale Climate Connections*. <https://yaleclimateconnections.org/2015/05/pros-and-cons-of-fracking-5-key-issues/>

Winter, L. (2016, 1 gennaio). Fueling Oil Scarcity: Produced Scarcity and the Sociopolitical Fate of Renewable Energy. *Journal of International Affairs*, Columbia University. <https://jia.sipa.columbia.edu/fueling-oil-scarcity-produced-scarcity-sociopolitical-fate-renewable-energy>

WNA (2021, maggio). *Storage and Disposal of Radioactive Waste*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-waste/storage-and-disposal-of-radioactive-waste.aspx>

WNA (2022). *Nuclear Power and Energy Security*. <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/energy-security.aspx>

WNA (2022, agosto). *Economics of Nuclear Power*. <https://world-nuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx>

WNA (2022, gennaio). *Radioactive Waste – Myths and Realities*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-wastes/radioactive-wastes-myths-and-realities.aspx>

- WNA (2022, giugno). *World Uranium Mining Production*. <https://world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/mining-of-uranium/world-uranium-mining-production.aspx>
- World Resources Institute (2017). *Climate Analysis Indicators Tool*. <https://www.climatewatchdata.org/ghg-emissions?source=CAIT>
- Wrigley, E. A. (2013). Energy and the English Industrial Revolution. *Phil. Trans. R. Soc.* 4-7. <http://doi.org/10.1098/rsta.2011.0568>
- Yanguas Parra, P. A., Ganti, G., Brecha, R., Hare, B., Schaeffer, M., Fuentes, U. (2019). *Global and regional coal phase out requirements of the Paris Agreement: Insights from the IPCC Special Report on 1.5°C*. Climate Analytics. https://climateanalytics.org/media/report_coal_phase_out_2019.pdf
- Yardley, J. (2007, 19 novembre). Chinese Dam Projects Criticized for Their Human Costs. *The New York Times*. <https://www.nytimes.com/2007/11/19/world/asia/19dam.html>
- Yıldız, I. (2018). 1.12 Fossil Fuels. Editor(s): Ibrahim Dincer. *Comprehensive Energy Systems*, Elsevier. 521-567. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809597-3.00111-5>
- Zasiadko, M. (2019, 16 luglio). Sinara Group assembles new type of LNG-powered locomotive. *RailTech.com*. <https://www.railtech.com/rolling-stock/2019/07/16/sinara-group-assembles-new-type-of-lng-powered-locomotive/?gdpr=accept>
- Zucchetti, M. (2005). L'origine antropica del cambiamento climatico. In AA.VV. "Scenari del XXI secolo", UTET, Torino, 2005. 237-242. https://www.researchgate.net/publication/293649261_L%27origine_antropica_del_cambiamento_climatico
- Zuhlke, S. (2022, 27 settembre). How Hydraulic Fracturing Works. *National Geographic Society*. <https://education.nationalgeographic.org/resource/how-hydraulic-fracturing-works>

Sitografia

europeanclimate.org Sito ufficiale European Climate Foundation

www.a2ep.org.au Sito ufficiale Australian Alliance for Energy Productivity

www.aics.gov.it Sito ufficiale Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo

www.api.org Sito ufficiale American Petroleum Institute

www.britannica.com Sito ufficiale Encyclopaedia Britannica

www.cfr.org Sito ufficiale Council on Foreign Relations

www.ciel.org Sito ufficiale Center for International Environmental Law

www.confindustriaenergia.org Sito ufficiale Confindustria energia

www.ec.europa.eu Sito ufficiale Commissione europea

www.edfenergy.com Sito ufficiale EDF

www.eea.europa.eu Sito ufficiale European Environment Agency

www.enea.it Sito ufficiale Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

www.enelgreenpower.com Sito ufficiale Enel

www.energy.gov Sito ufficiale US Department for Energy Efficiency and Renewable Energy

www.epa.gov Sito ufficiale Environmental Protection Agency

www.euronuclear.org Sito ufficiale European Nuclear Society

www.fusionforenergy.europa.eu Sito ufficiale Fusion for Energy

www.globalcarbonproject.org Sito ufficiale Global Carbon project

www.grida.no Sito ufficiale GRID-Arendal

www.heracomm.gruppohera.it Sito ufficiale Gruppo Hera

www.iea.org Sito ufficiale International Energy Agency

www.irena.org Sito ufficiale International Renewable Energy Agency

www.isprambiente.gov.it Sito ufficiale Istituto Superiore Protezione e Ricerca Ambientale

www.istat.it Sito ufficiale Istituto nazionale di statistica

www.iter.org Sito ufficiale Progetto ITER

www.lasers.llnl.gov Sito ufficiale Lawrence Livermore National Laboratory

www.lipumolise.altervista.org Sito ufficiale Sito Lega Italiana Protezione Uccelli Molise

www.nrel.gov Sito ufficiale National Renewable Energy Laboratory

www.pnnl.gov Sito ufficiale Pacific Northwest National Laboratory

www.politicheeuropee.gov.it Sito ufficiale Dipartimento per le politiche europee

www.seia.org Sito ufficiale Solar Energy Industries Association

www.shell.com Sito ufficiale Shell

www.treccani.it Sito ufficiale Treccani

www.un.org Sito ufficiale Organizzazione delle Nazioni Unite

www.usgs.gov Sito ufficiale USGS

www.wec-italia.org Sito ufficiale World Energy Council

www.wintershalldea.com Sito ufficiale Wintersall Dea

www.worldcoal.org Sito ufficiale World Coal Association

www.wwf.it Sito ufficiale WWF

www.uwsp.edu Sito ufficiale University of Wisconsin Stevens Point

Appendice

INDAGINE SULLE PREFERENZE DEI CONSUMATORI

Gentile partecipante,

sono uno studente del Corso di Laurea Magistrale in Management della Sostenibilità e del Turismo presso l'Università di Trento.

Chiedo la Sua disponibilità a partecipare ad un'indagine per la mia tesi di laurea che ha l'obiettivo di analizzare le preferenze dei consumatori nel settore energetico.

Cosa mi verrà chiesto di fare se prenderò parte all'indagine?

Durante l'indagine sarà invitato a:

- i) Compiere delle scelte tra diversi scenari di composizione e caratteristiche del mix energetico nazionale
- ii) Compilare un breve questionario circa le Sue opinioni e le Sue caratteristiche socio-demografiche (età, genere, etc.)

Devo partecipare?

L'adesione è volontaria. Sarà comunque libero di ritirarsi dallo studio in qualsiasi momento.

Come verranno utilizzati i dati da me forniti?

Le sue risposte sono completamente anonime e non possono essere collegate a Lei in alcun modo. Le informazioni qui raccolte verranno utilizzate per pubblicazioni di carattere scientifico.

La compilazione del questionario richiederà circa 15 minuti di tempo.

Solo le persone che hanno compiuto 18 anni possono partecipare allo studio.

Se ha qualche domanda, La prego di contattarmi o contattare la Prof.ssa Sandra Notaro utilizzando i seguenti indirizzi e-mail:

Youssef Angiari: youssef.angiari@studenti.unitn.it

Prof.ssa Sandra Notaro: sandra.notaro@unitn.it

Cliccando sull'icona "Avanti", Lei automaticamente acconsente a partecipare allo studio e dichiara di aver compiuto 18 anni.

La ringraziamo per la Sua partecipazione.

AVANTI

INTRODUZIONE AL CONTESTO

Nei prossimi 50 anni è prevista una crescita significativa del consumo energetico, dovuta all'aumento della popolazione mondiale e all'industrializzazione dei Paesi in via di sviluppo.

Tale previsione rende necessario utilizzare fonti energetiche che soddisfino la domanda di energia.

Le fonti fossili (carbone, petrolio e gas naturale) contribuiscono all'inquinamento dell'aria e al cambiamento climatico, mentre il solo utilizzo di rinnovabili potrebbe non rispondere adeguatamente alla domanda di energia a causa della dipendenza dalle condizioni meteorologiche e dell'impossibilità di conservare l'energia prodotta. Il nucleare convenzionale (fissione) invece è oggetto di dibattito, con sostenitori e detrattori e non più presente nella produzione elettrica italiana dal 1990.

AVANTI

UNA FONTE ENERGETICA ALTERNATIVA: LA FUSIONE NUCLEARE

Considerando la situazione energetica mondiale e nazionale, la **fusione nucleare** potrebbe essere una possibile soluzione sostenibile alla domanda crescente di energia elettrica.

La fusione nucleare è considerata una fonte inesauribile di energia pulita.

Il combustibile per far funzionare le centrali a fusione (deuterio e trizio) è disponibile e abbondante nell'acqua marina.

Il processo non genera gas serra, emissioni pericolose o particolato. Pertanto si presenta come un'energia pulita.

È una tecnologia più sicura del nucleare tradizionale (fissione) in quanto i residui della fusione hanno una radioattività di 50-100 anni rispetto alle migliaia di anni della fissione.

Inoltre, se si dovesse verificare un guasto, la fusione si fermerebbe subito, senza la possibilità di causare danni significativi.



*Sezione del reattore Tokamak dell'impianto ITER.
Fonte: UK Atomic Energy Authority*

AVANTI

Tuttavia, rendere possibile la fusione presenta delle sfide scientifiche ed ingegneristiche di difficile superamento a causa delle temperature elevatissime necessarie per il funzionamento.

Finora, gli esperti non hanno ancora individuato il modo di rendere economicamente vantaggioso il processo.

Molti sono i progressi fatti negli ultimi decenni e sono diversi i progetti in fase di sviluppo per portare la fusione nucleare sempre più vicina alla commercializzazione.

Si prevede che la prima centrale a fusione nucleare sarà effettivamente funzionante, fornendo energia alla rete elettrica, nel 2050 circa.

AVANTI

ALTRE INFORMAZIONI PRIMA DI PROSEGUIRE

L'energia elettrica viene prodotta con diverse fonti energetiche. Prendendo a riferimento il 2019, la composizione del **mix energetico** nazionale per la produzione dell'energia elettrica immessa nel sistema elettrico italiano comprende le seguenti voci:

Fonti primarie utilizzate	Percentuale
Fonti rinnovabili	41,74%
Carbone	7,91%
Gas naturale	43,20%
Prodotti petroliferi	0,50%
Nucleare*	3,55%
Altre fonti	3,10%

Fonte: Gestore dei Servizi Energetici

*Importazioni di energia nucleare da Paesi confinanti

AVANTI

Nelle scelte energetiche possono anche essere considerate le **interruzioni di corrente**. Queste rappresentano un'interruzione dell'approvvigionamento di energia elettrica.

A causare le interruzioni di corrente possono esserci diversi fattori scatenanti: incidenti o imprevisti, perturbazioni meteorologiche, disconnessione o interruzione di impianti oppure a errori umani.

La media delle interruzioni di corrente in Italia è presentata di seguito, divisa in base alla numerosità degli abitanti dei comuni. I dati si riferiscono all'anno 2019.

Abitanti per comune	Durata media annuale interruzioni di corrente
Inferiore ai 5.000 abitanti	58,87 minuti
Maggiore di 5.000 e inferiore ai 50.000 abitanti	39,50 minuti
Maggiore di 50.000 abitanti	29,38 minuti

Fonte: ARERA

AVANTI

LE SUE SCELTE DI ACQUISTO

Le sarà chiesto di compiere delle scelte di acquisto tra diversi scenari di produzione di energia elettrica comprendenti anche una quota di energia elettrica prodotta con la **fusione nucleare**, ipotizzando che quest'ultima sia una tecnologia già presente sul mercato.

In alternativa, può decidere di non modificare la composizione dell'attuale mix energetico, preferendo implicitamente di mantenere la situazione attuale.

Rispetto all'attributo *interruzioni di corrente*, Le chiediamo di considerare come situazione attuale la durata media riferita alla grandezza del comune in cui risiede. Es. se risiede in un comune di 30.000 abitanti, la durata media delle interruzioni di corrente in un anno sarà pari a 39,50 minuti

Le alternative di produzione energetica differiranno per gli elementi riportati nella tabella sottostante:

CARATTERISTICHE	DESCRIZIONE	SPIEGAZIONE	LIVELLI CARATTERISTICHE
NUCLEARE (%)	Quota di fusione nucleare all'interno del mix energetico nazionale.	Maggiore sarà la quota, minori saranno le potenziali emissioni climato-alteranti. Maggiore sarà la quota, maggiori sarà la quantità di scorie radioattive da gestire nel processo di smaltimento.	10% 25% 40% 60%
LOCALIZZAZIONE PRODUZIONE	Localizzazione delle centrali.	Una localizzazione nazionale dovrebbe favorire una migliore sicurezza energetica in quanto non si deve dipendere da soggetti terzi per l'approvvigionamento di energia elettrica.	Italia UE Extra-UE
INTERRUZIONI CORRENTE ANNUALI	Variazione di durata delle interruzioni di corrente rispetto alla media annuale nella situazione attuale.	La variazione nel tempo di interruzione della corrente potrebbe essere causata da: utilizzo di una nuova tecnologia per la produzione elettrica (fusione nucleare); gestione nazionale o estera della produzione che potrebbe influenzare la qualità e la costanza della fornitura di energia elettrica; etc.	+20 minuti +10 minuti -10 minuti -20 minuti
VARIAZIONE BOLLETTA ELETTRICITÀ ANNUALE	Variazione percentuale del costo sostenuto per i consumi di elettricità in un anno.	Variazione da intendersi rispetto al costo da Lei sostenuto lo scorso anno (2021).	+25% +10% -10% -25%

AVANTI

COME RISPONDERE AL QUESTIONARIO

Nella prossima sezione, Le verranno presentate 9 schede rappresentanti delle situazioni di scelta di scenari di produzione di energia elettrica.

Ogni situazione di scelta prevede due scenari futuri di produzione energetica comprendenti una quota di energia elettrica prodotta con la fusione nucleare, più la possibilità di non scegliere nessuno dei due scenari di produzione energetica, preferendo dunque di mantenere la situazione attuale.

In ognuna delle 9 situazioni di scelta, Le verrà chiesto di **valutare attentamente i due scenari di produzione energetica** per la generazione di energia elettrica e **scegliere** quello che, immaginando una **reale situazione**, preferirebbe.

Se non vuole scegliere nessuna delle alternative presentate selezioni l'opzione "Situazione attuale".

Questo è un esempio di scheda che rappresenta una situazione di scelta:

ESEMPIO SCHEDA

Scheda 0	SCENARIO DI PRODUZIONE A	SCENARIO DI PRODUZIONE B	SITUAZIONE ATTUALE
Nucleare (%)	25%	40%	Preferisco mantenere la situazione attuale
Localizzazione produzione	UE	Italia	
Interruzioni corrente annuali	+20 minuti	+10 minuti	
Variazione bolletta elettricità annuale	+10%	-25%	

Quale alternativa preferisce?



IMPORTANTE!

- ✓ Ogni scheda è una situazione di scelta presente in un determinato momento
- ✓ Gli scenari di produzione energetica in ogni scheda sono quindi le sole alternative disponibili in quel preciso momento
- ✓ Non metta quindi a confronto gli scenari di produzione energetica in schede diverse
- ✓ Scelga uno scenario di produzione energetica proposto in ogni scheda o scelga la situazione attuale, senza considerare le scelte già fatte

AVANTI

Importante!

Affinché la ricerca produca risultati attendibili e di qualità, Le chiediamo di rispondere nel modo più preciso possibile e dichiarare le Sue reali preferenze.

La preghiamo perciò di prestare attenzione anche alla variazione dei costi sostenuti annualmente nel pagamento della bolletta dell'elettricità e considerare attentamente se lei è disposto a pagare un prezzo eventualmente maggiore di quello che attualmente paga.

Pensi alle Sue effettive possibilità economiche. Consideri di dover sostenere quest'anno il costo della bolletta dell'elettricità annuale.

AVANTI

Ora Le chiediamo di compiere le Sue scelte:

BLOCCHI DI SCHEDE GENERATE DAL DISEGNO

(DOMANDA SPESA PER BOLLETTA) (viene chiesta prima della prima Choice card)

Quanto ha speso **complessivamente** per la bolletta dell'elettricità nell'anno 2021?

(Anche se non ricorda la cifra esatta, risponda con la sua migliore approssimazione) _____

(OPT-OUT REMINDER) (viene visualizzato appena prima della prima Choice card)

Nella seguente scheda di scelta, indichi se preferisce lo scenario di produzione A o lo scenario di produzione B, oppure la situazione attuale.

"Se pensa che le caratteristiche degli scenari di produzione alternativi non rappresentino un miglioramento rispetto all'attuale produzione elettrica, dovrebbe scegliere la situazione attuale".

(Dalla seconda scheda in poi)

Nella seguente scheda di scelta, indichi se preferisce lo scenario di produzione A o lo scenario di produzione B, oppure la situazione attuale, indipendentemente dalla scelta effettuata nello scenario precedente.

"Se pensa che le caratteristiche degli scenari di produzione alternativi non rappresentino un miglioramento rispetto all'attuale produzione elettrica, dovrebbe scegliere la situazione attuale".

ULTIMA SCHEDA

In tutte le schede precedenti ha sempre scelto la situazione attuale?

- Sì
- No

(questa domanda appare solo se ha risposto sì alla domanda precedente)

Se ha dichiarato sempre in ogni scheda di preferire la situazione attuale, potrebbe indicarne il motivo? (può scegliere solo una risposta)

- Ho bisogno di maggiori informazioni per prendere una decisione
- Non ritengo necessario l'utilizzo del nucleare per soddisfare la domanda energetica
- Mi sono sempre trovato bene con l'attuale mix energetico
- Preferisco investire nelle fonti rinnovabili
- La società ha problemi più importanti del cambiamento climatico e l'ambiente
- Mi oppongo al modo in cui viene chiesta la mia preferenza
- Altro. Specificare la motivazione _____

AVANTI

INDAGINE SULLE OPINIONI

Sulla base di quanto ha letto finora, come reputa l'energia prodotta mediante fusione nucleare?

La fusione nucleare per me è un'alternativa energetica_____

1. Molto scarsa
2. Scarsa
3. Discreta
4. Buona
5. Ottima

Di seguito sono elencate alcune affermazioni. Le chiedo di leggerle attentamente e di indicare cortesemente quanto è d'accordo o in disaccordo con ciascuna affermazione.

Ritengo che la fusione nucleare...

	Per niente d'accordo	Non d'accordo	Non saprei	D'accordo	Molto d'accordo
...sia tecnologicamente impraticabile.					
...sia troppo costosa da sviluppare (in termini di investimenti nella ricerca, sviluppo e verifica della fattibilità).					
...contribuisca positivamente sul sistema energetico (in termini di sicurezza energetica, diversificazione delle fonti di approvvigionamento, etc.).					
...abbia un impatto positivo sull'ambiente (in termini di potenziale impatto sulla terra, l'acqua, l'atmosfera, etc.).					
...abbia un impatto negativo sulla salute umana.					
...sia competitiva (in termini di prezzo dell'elettricità prodotta).					

AVANTI

Di seguito sono elencate alcune affermazioni. Le chiedo di leggerle attentamente e di indicare cortesemente quanto è d'accordo o in disaccordo con ciascuna affermazione.

	Per niente d'accordo	Non d'accordo	Né d'accordo né in disaccordo	D'accordo	Molto d'accordo
Anziché investire nella fusione nucleare, dovremmo focalizzarci su soluzioni alternative, come le energie rinnovabili (solare, eolico, etc.).					
Anziché investire nella fusione nucleare, dovremmo focalizzarci su soluzioni alternative, come le tecnologie di risparmio e efficientamento energetico.					
Anziché investire nella fusione nucleare, dovremmo focalizzarci su soluzioni alternative, come fonti energetiche convenzionali (petrolio, gas naturale, carbone).					

AVANTI

Di seguito sono elencate alcune affermazioni. Le chiedo di leggerle attentamente e di indicare cortesemente una sola risposta.

Quali delle seguenti affermazioni esprime meglio la sua visione sulla fusione nucleare?

1. La fusione nucleare potrebbe rappresentare un'importante fonte di energia elettrica e i Paesi interessati dovrebbero finanziarne la ricerca.
2. La fusione nucleare potrebbe essere o non essere una fonte praticabile di energia elettrica. Dovremmo continuare la ricerca sulla fusione nucleare ma dare priorità ad altre fonti energetiche.
3. La fusione nucleare è una fonte energetica non necessaria e pericolosa. Dovremmo ridurre o cancellare il programma di ricerca e investire in fonti energetiche o programmi alternativi.

Di seguito sono elencate alcune affermazioni.

Indichi cortesemente quanto è d'accordo o in disaccordo con ciascuna di esse.

	Per niente d'accordo	Non d'accordo	Non saprei	D'accordo	Molto d'accordo
L'accesso all'energia e la continuità dell'erogazione incidono sul benessere della società.					
La produzione di energia rappresenta oggi una fonte di emissioni di gas serra.					
L'uso di fonti energetiche fossili (carbone, petrolio e gas naturale) concorrono al fenomeno del riscaldamento globale.					
Le fonti rinnovabili (fotovoltaico, eolico, idroelettrico, etc.) potrebbero sostenere l'intero fabbisogno elettrico giornaliero nazionale.					
L'energia nucleare tradizionale (fissione) rappresenta una fonte energetica a basse emissioni.					
Si dovrebbe utilizzare in misura maggiore l'energia nucleare tradizionale (fissione) per la					

produzione di energia elettrica.					
L'Italia gode di un accesso sicuro alle fonti energetiche.					
Si può soddisfare l'attuale e futura domanda energetica utilizzando le tecnologie attualmente a disposizione, senza necessità di svilupparne di nuove.					

AVANTI

INFORMAZIONI SOCIODEMOGRAFICHE

Ricordiamo che l'indagine è **anonima**.

I dati raccolti saranno utilizzati e diffusi solo per scopi statistici in forma aggregata.

1. Genere
 - Femminile
 - Maschile
 - Altro (non mi identifico nei generi menzionati)

2. Anno di nascita: _____

3. Nazionalità:
 - Italiana
 - Estera

4. In quale provincia risiede? _____
5. Qual è il numero di abitanti nel Suo comune?
 - Meno di 5.000 abitanti
 - Tra 5.000 e 50.000 abitanti
 - Più di 50.000 abitanti
6. Quale è il Suo titolo di studio?
 - Scuole medie
 - Scuole superiori
 - Laurea Triennale
 - Laurea magistrale, laurea a ciclo unico, Master
 - Dottorato di ricerca

7. Qual è il Suo stato sociale?

- occupato
- disoccupato
- studente
- pensionato
- altro (specificare _____)

8. Ha figli?

- Sì
- No

Se sì, quanti? _____

Se sì, quanti di questi hanno meno di 12 anni? _____

9. È iscritto a gruppi di associazioni ambientaliste quali WWF, Legambiente, ecc....?

- Sì
- No

10. Qual è il Suo reddito individuale (al netto delle imposte) da Lei conseguito lo scorso anno (2021)?

- Nessuno, non percepisco reddito
- meno di 9.999 €
- tra 10.000€ e 19.999€
- tra 20.000€ e 29.999€
- tra 30.000 e 39.999€
- tra 40.000€ e 59.999€
- superiore a 60.000€

11. Se dovesse definire il Suo orientamento politico, in quale dei seguenti si identifica maggiormente?

- destra
- centro
- sinistra

La ringraziamo per aver preso parte all'indagine.