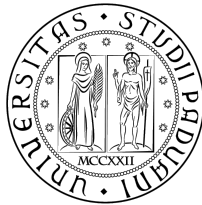


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE POLITICHE, GIURIDICHE E
STUDI INTERNAZIONALI

Corso di laurea *Magistrale* in
Scienze del Governo e Politiche Pubbliche



**IL DIBATTITO SULL'ENERGIA SOSTENIBILE:
L'ENERGIA NUCLEARE È UN TIPO
DI ENERGIA GREEN?**

Relatore: Prof.ssa PATRIZIA MESSINA

Laureando: MIRKO FERRARA
matricola N. 1238583

A.A. 2021/2022

ABSTRACT

Il tema dell'energia nucleare è ritornato a essere un punto programmatico di molti partiti nazionali. Il motivo va rintracciato in primis nella situazione climatica attuale, nella necessità di decarbonizzare il processo produttivo e, in seconda battuta, nelle complesse relazioni internazionali con il maggior fornitore di gas naturale e petrolio, la Russia. Molti pongono nuovamente le proprie speranze nella fissione nucleare: visti i recenti progressi scientifici, la crescente necessità di energia pulita e gli attuali orientamenti politici dei paesi del mondo sul tema, occorre quindi valutare l'energia nucleare nella maniera più oggettiva possibile in vista del futuro. Per farlo è stato necessario soffermarsi e contestualizzare la situazione attuale dell'energia nucleare dal punto di vista ambientale, politico e scientifico, per poter poi entrare nel merito delle esigenze dell'Italia e di come queste possano essere soddisfatte o meno dall'energia nucleare e dalle sue caratteristiche. Il seguente lavoro di tesi consta di tre capitoli: il primo è dedicato al problema del cambiamento climatico e della CO₂ che ne è causa; il secondo ripercorre le tappe politiche recenti nel mondo sul nucleare, con particolare attenzione all'Unione Europea e all'Italia; il terzo capitolo analizza e fornisce una visione più tecnica sull'energia nucleare, prendendo in esame gli aspetti più importanti per poi contestualizzarli nella realtà italiana. Verrà discusso infine come la fissione nucleare, sebbene possa essere annoverata tra le fonti di energia *green*, non possa essere attualmente la risposta alle esigenze energetiche dell'Italia.

INDICE

INTRODUZIONE.....	3
CAPITOLO I	
CAMBIAMENTO CLIMATICO ED ENERGIE RINNOVABILI	
1.1 Il cambiamento climatico: un problema già noto	7
1.2 Le energie rinnovabili in Italia	9
1.3 L'energia nucleare è una fonte di energia green?	11
1.4 Le Green Communities	11
CAPITOLO II	
ENERGIA NUCLEARE IN EUROPA E NEL MONDO	
2.1 La posizione dell'Unione Europea sull'energia nucleare.....	15
2.2 Il nucleare all'interno dell'Unione Europea	16
2.3 Il caso della Francia.....	19
2.4 Altri paesi leader nel campo del nucleare: Russia, Cina, Corea del Sud e Stati Uniti	22
2.5 Storia del nucleare in Italia.....	26
CAPITOLO III	
SULLA SOSTENIBILITÀ DELL'ENERGIA NUCLEARE	
3.1 Il “capacity factor”: la produttività energetica reale e potenziale del nucleare.....	32
3.2 Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi: lo stoccaggio, il riprocessamento delle scorie e i pericoli di infiltrazioni malavitose	33
3.3 Sicurezza nucleare.....	36
3.4 Costi di produzione di energia nucleare	41
3.5 I diversi tipi di reattori nucleari a fissione.....	47
3.6 Quanti reattori servirebbero all'Italia?	53
3.7 Prospettive future: la fusione nucleare	55
CONCLUSIONI	59
BIBLIOGRAFIA.....	67
SITOGRAFIA.....	79
RINGRAZIAMENTI.....	81

INTRODUZIONE

Il tema dell'indipendenza energetica e quello della diversificazione delle fonti energetiche sono tornati a essere una priorità dell'agenda politica e dell'opinione pubblica a seguito dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia e del conseguente aumento del prezzo del gas naturale e del petrolio nei mercati mondiali, soprattutto in quelli europei. Le esigenze di diversificare le fonti e di aumentare l'indipendenza energetica si legano al bisogno sempre più crescente di decarbonizzare il nostro intero sistema produttivo, non solo quello energetico. In questo contesto si inserisce questo lavoro di tesi che ha l'obiettivo di rispondere a una domanda principale: "L'energia nucleare è *green*?"; ma aspira anche a rispondere a una domanda più vicina alla realtà e alle esigenze dell'Italia: "L'energia nucleare è sostenibile?".

L'incipit di questo lavoro ha lo scopo di contestualizzare la ricerca dal punto di vista ambientale. Partendo dallo scorso secolo, infatti, gli scienziati hanno esortato i politici ad agire prontamente alle crescenti problematiche ambientali che via via si andavano ad amplificare e delle quali la causa era già ben nota, la CO₂ emessa dall'attività umana. Viene poi presentato il tema delle energie rinnovabili in Italia: quali sono secondo la normativa nazionale, come funzionano e quanto queste incidano nel nostro mix energetico nazionale. Le energie rinnovabili vengono oggi considerate la principale soluzione al problema dell'inquinamento di CO₂; paragonando infatti le emissioni delle fonti di energia rinnovabili con quelle da derivazione fossile, si nota come le prime siano di gran lunga meno inquinanti, caratteristica che condividono con l'energia nucleare.

Per rispondere alle domande che spingono questa tesi è necessario analizzare le scelte politiche sul nucleare operate dall'Unione Europea, dai paesi più vicini all'Italia e dai paesi che nel mondo hanno deciso di implementare il nucleare e investirvi cospicuamente. Quello che emerge è una situazione parecchio frammentata all'interno dell'Unione Europea: se da una parte vi è uno schieramento di paesi che non possiedono centrali nucleari per vari motivi, dall'altra ci sono paesi che del nucleare hanno fatto il pilastro più importante del loro mix energetico nazionale. Per quanto riguarda il mondo la

situazione è ben più definita, le più grandi potenze economiche del mondo fanno largo uso dell'energia nucleare e continuano a investirvi. In questo contesto politico si inserisce l'Italia che è passata dall'essere, negli anni '60 del Novecento, uno dei paesi con i reattori più all'avanguardia del mondo a essere, oggi, l'unico paese del G7 a non avere alcun reattore nucleare e in cui l'opinione pubblica ha ribadito già in due occasioni, dal 1987 ad oggi, attraverso due referendum, di non essere più favorevole al nucleare. Nonostante questo però oggi si ritorna a parlare di energia nucleare in Italia per via della difficile situazione economica che ha investito il paese e l'intero continente. Gli aspetti relativi alla produzione di energia nucleare danno infine un quadro generale su quali siano i pro e i contro di questa fonte di energia, alcuni dei quali potrebbero risultare particolarmente interessanti. Uno di questi è sicuramente il *capacity factor*, un altro è la sicurezza nucleare che, negli anni, ha compiuto importanti progressi, rendendo probabilisticamente quasi irripetibili incidenti come quello di Černobyl'. Oltre a questi due aspetti risulta importante analizzare: i costi relativi all'energia nucleare, non solo quelli economici ma anche quelli politici e soprattutto temporali; quali reattori siano attualmente reperibili nel mercato e quali siano invece tutt'ora in fase di studio e sperimentazione; di quanti e di quali reattori avrebbe bisogno l'Italia. Ultimo approfondimento viene lasciato al tema della fusione nucleare, delle differenze tra questa e la fissione e del perché oggi costituisca una speranza molto promettente e su cui è importante investire.

Per affrontare il tema del nucleare e rispondere alle domande che sono alla base di questo lavoro è necessario affrontare il tema da diversi punti di vista. Bisogna innanzitutto, come detto, circoscrivere il tema dal punto di vista storico e politico, identificando, attraverso un'indagine svolta su vari siti di informazione, gli avvenimenti più cruciali sul tema dell'energia nucleare che si sono succeduti nel tempo. È altrettanto necessario però individuare e analizzare le tematiche più strettamente tecniche legate a questo tema; per farlo è risultato fondamentale avvalersi di articoli, riviste e testi di stampo più scientifico, con lo scopo di rendere la valutazione finale quanto più concreta ed efficace.

Alla fine di questo elaborato risulta dunque doveroso rispondere alle domande che muovono questa ricerca e questo lavoro di tesi. Si tenta quindi di tirare le somme e di

fornire una valutazione quanto più completa e oggettiva su un tema di cui oggi si è tonato a parlare e che di sicuro rimarrà, in Italia, nell'agenda politica e nei pensieri di molti.

CAPITOLO I

CAMBIAMENTO CLIMATICO ED ENERGIE RINNOVABILI

In questo capitolo si affronterà il tema del cambiamento climatico e di come, nonostante gli studi e, successivamente, gli avvertimenti degli scienziati, la produzione di energia non si sia mossa più velocemente in passato verso fonti più sostenibili, con minori emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera. Verranno brevemente analizzate le varie forme di energie rinnovabili e quale sia il loro impatto, a oggi, nel sistema di produzione energetica italiano. Si risponderà a una prima domanda sul tema principale di questa tesi che verrà approfondito nei capitoli successivi: “Quali sono le emissioni di CO₂ della produzione di energia nucleare?”. Infine si analizzerà il tema delle “*green communities*”, cercando di capirne gli obiettivi e il ruolo nella società odierna.

1.1 Il cambiamento climatico: un problema già noto

L'ipotesi che la combustione di combustibili fossili, e il relativo rilascio nell'atmosfera di anidride carbonica, potesse incidere sulla temperatura del pianeta fu proposta già nel 1896 da Svante Arrhenius, allora professore di fisica dell'Università di Stoccolma.¹ Questa ipotesi si scontrava con il pensiero comune dell'epoca, si riteneva infatti che gli oceani assorbissero l'anidride carbonica in eccesso presente nell'atmosfera. Fu la scoperta pubblicata da Roger Revelle e Hans Suess, due fisici statunitensi, nel 1957 a mettere in discussione la teoria secondo cui fossero gli oceani a sopperire rapidamente agli sbalzi di CO₂ presente nell'atmosfera; i due fisici infatti compresero come il ciclo

¹ Interessante approfondimento sugli studi di Svante Arrhenius su Nasa Earth Observatory, 2000.

dell'anidride carbonica nell'atmosfera fosse più lungo di quanto si pensasse in precedenza, osservando che questa impiega circa dieci anni per essere dissolta negli oceani.²

Altri studi effettuati tra il 1960 e il 1980 mostrano come i livelli di anidride carbonica e altri gas serra siano aumentati drasticamente e come questi influenzino il clima in tutto il pianeta.

Già a partire dalla seconda metà degli anni '70 del secolo scorso, molti governi si interessano all'argomento del cambiamento climatico, soprattutto da un punto di vista informativo. L'amministrazione statunitense si mosse in tal senso e commissionò ricerche sul tema. Una di queste fu quella del meteorologo statunitense Jule Gregory Charney, che nel 1979 presentò un resoconto scientifico sugli effetti della CO₂ sul clima che passò alla storia come "Charney Report". All'interno del report lo scienziato presenta due diversi scenari, uno che vede un aumento della temperatura media di 2°C entro il 2035 con danni medio-gravi su tutti gli ecosistemi del pianeta, e un altro che prevede un aumento della temperatura media di 4°C con danni gravissimi ai vari ecosistemi del pianeta. Charney afferma inoltre che l'attesa nel prendere provvedimenti porterà a un cambiamento inevitabile del clima.³

Il cambiamento climatico oggi è una realtà estremamente tangibile, gli effetti del surriscaldamento globale continuano a manifestarsi sempre più comunemente e violentemente. Secondo il rapporto 2021 dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale (WMO), gli anni che vanno dal 2015 al 2019 sono stati i più caldi di sempre e nel 2021 quattro indicatori chiave del cambiamento climatico hanno raggiunto nuovi record negativi: concentrazione di gas serra, innalzamento del livello dei mari, temperatura e acidificazione degli oceani. Secondo lo studio della WMO, nei prossimi 5 anni la temperatura media globale aumenterà di 1,5°C rispetto ai livelli preindustriali.⁴

Questo aumento continuo di temperature, l'innalzamento del livello del mare, la siccità e la desertificazione porteranno a gravi danni non solo agli ecosistemi, ma anche alla vita dell'essere umano. L'OXFAM e Save the Children stimano infatti che in Africa

² Cfr. history.aip.org, riportante i risultati delle ricerche di R. Revelle e H. Suess, 2021.

³ Cfr. Buoninconti, 2016, sul rapporto Chamey.

⁴ World Meteorological Organization, *The State of the Global Climate*, 2021.

muoia circa una persona ogni 48 secondi per ragioni legate ai cambiamenti climatici e che si perdano milioni di chilometri quadrati di terreni coltivabili per l'innalzamento dei mari e per la desertificazione (ISPI, 2022).

Ridurre l'utilizzo o smettere completamente di utilizzare combustibili fossili oggi non ci restituirà mai la situazione climatica in cui si trovava la Terra prima dell'industrializzazione. Al contempo però, una drastica riduzione dell'impiego di carbone, petrolio e gas possono evitare di raggiungere soglie critiche che rischierebbero di compromettere nel medio periodo l'esistenza stessa della vita sulla Terra. La via da percorrere è quella delle energie rinnovabili.

1.2 Le energie rinnovabili in Italia

Vengono chiamate risorse rinnovabili tutte quelle risorse naturali che si rinnovano nel tempo e possono farlo per un tempo indefinito e molto rapidamente. L'energia che viene prodotta da risorse naturali è sostenibile quando il tasso di rigenerazione delle risorse è superiore o uguale al tasso di utilizzo. Produrre energia da queste fonti rinnovabili è quindi un modo sostenibile da un punto di vista economico, in quanto le risorse sono sempre disponibili, e da un punto di vista climatico, in quanto la produzione e l'utilizzo di queste energie non comporta alcuna emissione di CO₂ nell'atmosfera.

Le energie rinnovabili, secondo la normativa italiana, sono l'energia solare, l'energia eolica, l'energia geotermica, l'energia idroelettrica, l'energia da biomasse e l'energia oceanica.

- L'energia solare è la fonte rinnovabile più comune in Italia per via della ormai facilità con cui si possono reperire nel mercato questi sistemi di produzione energetica. Questa consiste nel trasformare l'energia dei raggi solari in energia spendibile per l'utilizzo civile attraverso impianti fotovoltaici o solari. Gli impianti fotovoltaici trasformano l'energia solare in energia elettrica, possono essere direttamente installati sui tetti delle case o dei condomini. Gli impianti solari sono invece collegati a serbatoi di accumulo, il calore dei raggi solari ne riscalda il contenuto sostituendo le caldaie delle abitazioni.

- L'energia eolica viene generata servendosi di sistemi di pale eoliche che, grazie alla forza cinetica del vento, producono energia meccanica che viene trasformata in energia elettrica tramite turbine. Per garantire una buona resa è necessario che le pale vengano posizionate strategicamente, in ampie zone ventose.
- L'energia geotermica viene prodotta sfruttando il calore naturale della terra. Questo calore si manifesta attraverso fenomeni naturali come geysir, sorgenti termali e soffioni e viene trasformato in energia elettrica tramite le centrali geotermiche. Il vapore proveniente dalle zone sottostanti la crosta terrestre fa muovere le turbine che generano energia meccanica, è poi un alternatore a trasformare l'energia meccanica in energia elettrica.
- L'energia idroelettrica viene prodotta sfruttando l'energia cinetica dei moti delle acque. Tramite le turbine l'energia cinetica viene trasformata in energia elettrica. Questo processo avviene nelle centrali idroelettriche situate vicino corsi o bacini d'acqua dolce o vicino al mare, in una posizione comunque favorevole per sfruttare il moto naturale delle acque.
- L'energia da biomasse è prodotta da scarti organici prodotti dall'uomo, è pertanto un'energia non del tutto inesauribile. Si produce energia a partire da scarti di combustione, da sostanze organiche e rifiuti industriali o agricoli.
- L'energia oceanica o marina è generata sfruttando il movimento delle correnti marine o il moto delle onde. La sua produzione è simile a quella eolica, prevede il posizionamento di turbine sottomarine in grado di sfruttare il movimento di grandi masse d'acqua per generare energia.

Nel 2020, in Italia, secondo il rapporto statistico GSE 2020, il 37% del fabbisogno energetico italiano è stato soddisfatto dalle energie rinnovabili.⁵ Sono stati prodotti infatti 116 TWh di energia elettrica da fonti rinnovabili, 900MWh derivanti da nuovi impianti entrati in funzione nel biennio 2019-2020, la maggior parte dei quali fotovoltaici. Nel 2020 in Italia si contano 950.000 impianti per la produzione di energie rinnovabili, la quasi totalità dei quali è destinata alla produzione di energia solare (ANSA, 2021).

⁵ Si cita Rapporto Statistico GSE - FER, 2020.

1.3 L'energia nucleare è una fonte di energia *green*?

L'energia nucleare è un tipo di energia prodotta sfruttando la fissione degli atomi di uranio. In quanto prodotta da un materiale non presente in quantità infinite in natura, non è possibile affermare che si tratti di una fonte di energia rinnovabile. Ma l'energia nucleare presenta delle caratteristiche che possono essere allettanti per uno sviluppo energetico sostenibile e che gravi il meno possibile sul clima. La produzione di energia da fissione rilascia decisamente meno CO₂ rispetto alle fonti fossili e si attesta a una produzione di CO₂ simile a quella degli impianti fotovoltaici, circa 40-53g di CO₂ per kWh (Focus, 2010).

Secondo i dati relativi al safety rate delle varie fonti di energia, il nucleare risulta essere, insieme alle fonti di energia rinnovabili, tra le meno inquinanti attualmente disponibili. I dati sulle emissioni di CO₂ per gigawatt-ora sono (Ritchie, 2020):

- carbone: 820 tonnellate;
- petrolio: 720 tonnellate;
- gas naturale: 490 tonnellate;
- biomasse: dalle 78 alle 230 tonnellate;
- idroelettrico: 34 tonnellate;
- solare: 5 tonnellate;
- eolico: 4 tonnellate;
- nucleare: 3 tonnellate.

1.4 Le *Green Communities*

L'abbandono delle zone rurali d'Europa è uno dei temi su cui la Commissione europea e le altre istituzioni, attraverso piani di aiuto e investimento, cercano di porre rimedio. La nascita delle comunità verdi, meglio note come "*green communities*", è uno degli strumenti fortemente stimolati dall'UE. Queste consentono alle aree di svilupparsi in

maniera sostenibile, di aiutare la transizione ecologica europea e di invertire la tendenza del loro abbandono (Martiny, 2021).

Le “*green communities*” hanno l’obiettivo favorire uno sviluppo sostenibile dei territori, cercando di sfruttare al meglio le risorse disponibili, investendo quindi in (Green-Communities, 2022):

- riciclo dei rifiuti: riducendo al minimo indispensabile lo spreco riutilizzando il più possibile;
- riduzione del consumo di energia: investendo nell’educazione al consumo energetico, incentivando il risparmio;
- riduzione dell’utilizzo della plastica: incentivando le popolazioni a usare contenitori, sacchi e imballaggi di facile smaltimento e riciclo;
- razionalizzazione del consumo dell’acqua: prevenendo gli sprechi domestici e delle reti;
- agricoltura biologica e a “*km 0*”;
- turismo ecologico: investendo su un turismo più pulito, con riferimento soprattutto a spostamenti, alloggi e attività ricreative;
- produzione di energia pulita, a seconda delle caratteristiche del territorio;
- salvaguardia del patrimonio naturale e infrastrutturale del territorio.

Il Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza del 2021 prevede al suo interno numerosi stanziamenti per la nascita di nuove “*green communities*” e per il finanziamento di progetti volti all’efficienza di queste. Nello specifico, gli investimenti saranno rivolti a (Rinnovabili, 2022):

1. gestione del patrimonio forestale;
2. gestione delle risorse idriche;
3. produzione di energia da fonti rinnovabili;
4. sviluppo del turismo ecologico;

5. costruzione e gestione del patrimonio edilizio e delle “infrastrutture di una montagna moderna”;
6. efficienza energetica e ammodernamento delle reti e degli impianti;
7. “sviluppo sostenibile delle attività produttive”;
8. servizi di mobilità sostenibile;
9. agricoltura sostenibile.

CAPITOLO II

ENERGIA NUCLEARE IN EUROPA E NEL MONDO

Per parlare di un tema così importante e intrigante come quello del nucleare, è necessario contestualizzarlo storicamente e politicamente. Nel seguente capitolo verrà affrontata la domanda: “Chi utilizza il nucleare in UE e nel mondo?”, cercando di fornire un quadro generale sulla situazione europea e mondiale.

Verranno dunque presi in esame il caso europeo e della tassonomia verde che, ufficialmente da luglio 2022, comprenderà l'energia nucleare e il gas naturale come fonti di energia tassabili come energie “*green*”, decisione che ha suscitato numerose proteste e malumori tra i vari schieramenti politici europei; il caso dei paesi che hanno deciso di dismettere le loro centrali nucleari, come Germania e Spagna, con particolare attenzione ai risvolti politici, anche recenti, dovuti soprattutto alla situazione geopolitica; il caso di quei paesi che, invece, stanno investendo molto su questo per vari motivi politici ed economici, come Francia, Finlandia e Polonia; verranno individuati i leader mondiali nel campo del nucleare, come Russia, Corea del Sud, Cina e Stati Uniti. Infine si farà un excursus sulla storia italiana sul nucleare: si partirà dagli albori del programma atomico nazionale, passando per la realizzazione delle quattro centrali e la loro repentina chiusura a seguito del referendum del 1987 fino alla campagna elettorale 2022, in cui, alcuni tra i più influenti partiti politici nazionali si sono fatti portatori della battaglia a sostegno del nucleare. Saranno pertanto analizzati e brevemente commentati i programmi elettorali delle forze politiche in campo, verranno individuati i punti relativi all'energia atomica e i loro relativi elementi di forza e di debolezza.

2.1 La posizione dell'Unione Europea sull'energia nucleare

Nel luglio 2022, Il Parlamento dell'Unione Europea si è espresso a sfavore di una mozione che voleva escludere gas naturale e energia nucleare dalla tassonomia verde, riguardante le attività economiche eco-sostenibili. Con questo voto il Parlamento quindi consente alla Commissione europea di continuare il suo lavoro sulla tassonomia *green*, identificando così il gas naturale e il nucleare come fonti di energia pulite, consentendo pertanto gli investimenti pubblici su questi due settori. La scelta, meramente politica, di inserire il nucleare tra le fonti di energia *green* è stata fortemente sostenuta dai paesi che soddisfano parte del loro fabbisogno energetico grazie al nucleare, come Francia, Bulgaria, Ungheria e Repubblica Ceca, ma anche da paesi che sono intenzionati a raggiungere una maggiore indipendenza energetica, necessità dovuta soprattutto alla situazione geopolitica attuale, come ad esempio la Polonia che ha deciso di avviare progetti per la creazione di reattori nucleari. Altri paesi invece, come Austria e Lussemburgo, si sono dimostrati contrari alla scelta di annoverare tra le energie pulite anche il gas naturale e il nucleare.¹

La scelta di inserire anche l'industria del gas naturale tra le industrie *green*, quindi meritevole di ricevere investimenti pubblici, è risultata in forte contrasto con l'intento della stessa Commissione europea di raggiungere la neutralità climatica europea entro il 2035 e con alcuni principi del *Green Deal* europeo del 2019 che impone, come obiettivo principale per l'intera Unione Europea, il raggiungimento, entro il 2050, dell'azzeramento di emissioni di gas serra nell'atmosfera (La Repubblica 2022).

Contrari alla decisione del Parlamento europeo e al lavoro sulla tassonomia verde che includa il gas naturale e l'energia atomica sono stati i Verdi e la Sinistra europea, oltre a molte organizzazioni non governative, come Greenpeace.²

2.2 Il nucleare all'interno dell'Unione Europea

La situazione europea sul tema dell'energia nucleare è alquanto particolare. Nel 2022 sono 14 su 27 i paesi non producono energia nucleare. Questi sono, oltre l'Italia, Danimarca, Estonia, Irlanda, Grecia, Croazia, Cipro, Lettonia, Lituania, Lussemburgo, Malta, Austria, Polonia e Portogallo. Nel resto dei paesi dell'Unione sono in funzione 122

¹ Ilsole24ore, 06/07/2022.

² Si cita *La rinascita nucleare* di "Presadiretta", puntata dell'11/09/2022, Rai 3.

reattori nucleari, di cui solo 56 in Francia.³ L'opinione dei vari governi europei è molto diversa sul tema dell'energia nucleare.

In Germania, già qualche mese prima degli avvenimenti di Fukushima, nel marzo 2011, il governo tedesco, guidato da Angela Merkel, decise di sospendere il rinnovo dell'attività delle centrali nucleari e di avviare un processo di abbandono del nucleare (Reuters, 2011). A seguito dell'incidente di Fukushima, in Giappone, dovuto al maremoto nell'agosto 2011, la produzione di energia elettrica delle centrali nucleari in Germania fu fermata per iniziare un'opera di controllo e manutenzione straordinaria: alcuni dei reattori furono fermati e smisero di produrre energia proprio il 6 agosto 2011, si trattava infatti di reattori risalenti all'ultima metà degli anni '70 dello scorso secolo; altri invece ripresero a funzionare dopo mesi di manutenzioni. L'incidente di Fukushima avvalorò certamente la decisione del governo tedesco, prese corpo sempre più l'ipotesi di porre fine al progetto nucleare entro la fine del 2022. Le reazioni a questa decisione furono tra le più disparate. Da una parte, gli industriali tedeschi si opposero alla decisione del governo, pronosticando un aumento dei costi dell'energia e di conseguenza un rallentamento della produzione nazionale, oltre che un aumento dell'insicurezza energetica del paese, in quanto il nucleare copriva circa il 17,8% del fabbisogno energetico del paese.⁴ Dal canto suo, Greenpeace ha sostenuto che la data fissata al 2022 fosse troppo lontana e che, invece, il 2015 fosse ideale e facilmente realizzabile (Gangemi 2011).

La compagnia energetica tedesca E.On che nel 2011 gestiva 6 dei 17 reattori ancora attivi, intentò causa allo Stato per la decisione presa dal governo, richiedendo danni come risarcimento all'azienda e agli azionisti, evidentemente colti di sorpresa dalla decisione, in quanto, la stessa Angela Merkel, nell'ottobre 2010, dichiarò di essere favorevole a rinnovare il programma nucleare (Gangemi 2011).

La situazione geopolitica sviluppatasi nel 2022, con l'invasione perpetrata ai danni dell'Ucraina da parte della Russia, paese sul cui gas naturale la Germania non può più far affidamento per via delle sanzioni e dei rapporti internazionali, ha modificato, o quantomeno ritardato, la decisione presa nel 2011. Le ultime tre centrali nucleari del

³ Euratom Supply Agency "Annual Report", 2020.

⁴ IAEA, PRIS database, Nuclear Power Plant Information, 2021.

paese infatti dovevano interrompere la loro produzione di energia elettrica entro dicembre 2022, ma il governo tedesco, guidato dal cancelliere Olaf Scholz, ha deciso di prorogare la produzione energetica di due di queste fino all'aprile 2023, in maniera da garantire al paese anche l'energia proveniente dal nucleare durante l'inverno (ilPost 2022).

La Spagna ha intrapreso un progetto analogo a quello tedesco. Dal 2019 infatti, il governo a guida Pedro Sanchez ha avviato un programma di abbandono del nucleare con l'obiettivo di spegnere tutti e 7 i reattori ancora attivi tra il 2027 e il 2035. L'energia nucleare in Spagna incide per il 20,8% sul fabbisogno energetico. Il progetto del governo è quello di investire sulle rinnovabili, elettrificando il più possibile per arrivare, già entro il 2030, a coprire il 70% del fabbisogno attraverso energia *green* (Rinnovabili, 2019).

Un paese che ha trovato nel nucleare una soluzione a una carenza di approvvigionamento energetico è la Finlandia. Negli anni '70 del Novecento, il paese scandinavo ha implementato il suo programma nucleare per porre rimedio a una crescente necessità di energia nel paese e a una riduzione della dipendenza dai paesi limitrofi, soprattutto dalla Russia, per l'approvvigionamento energetico. La Finlandia ha oggi 5 reattori attivi, l'ultimo, entrato in funzione nei primi mesi del 2022, è stato realizzato con l'obiettivo di velocizzare il processo di decarbonizzazione e di riduzione della dipendenza dagli altri paesi e, secondo le stime, porterà al 60% la quota di soddisfacimento del fabbisogno energetico del paese attraverso il nucleare. La centrale di Olkiluoto, di cui questo ultimo reattore è il terzo della centrale, si candida a essere la più produttiva d'Europa (AIN 2021), (Corriere della Sera, 2022).

Nella via della nuclearizzazione è anche la Polonia. Il paese è infatti il più grande consumatore e uno dei maggiori produttori di carbone in Europa, e la centrale a carbone di Belchatow è quella più potente d'Europa, coprendo da sola il 20% del fabbisogno energetico del paese.⁵ La dipendenza dai combustibili fossili e, soprattutto, dal carbone, inconciliabile con la necessità di energia pulita e con il progetto europeo di decarbonizzazione, ha spinto il paese verso il nucleare. Nonostante il paese storicamente sia contro

⁵ Approfondimento sulla storia della centrale a carbone più potente d'Europa, power-technology.com, 2011.

le centrali nucleari, soprattutto per via delle conseguenze avute a causa dell'incidente di Černobyl' e per la paura che un incidente simile potesse verificarsi nuovamente,⁶ nel 2009 l'allora governo si disse favorevole a progettare la realizzazione di due centrali nucleari con l'obiettivo di soddisfare il 15% delle necessità energetiche del paese. Durante gli anni seguenti, i vari governi che si succedettero iniziarono un processo legislativo che avrebbe consentito la realizzazione dei progetti nucleari e la successiva realizzazione delle centrali. Tra il 2010 e il 2020 sono stati realizzati studi di fattibilità e studi per l'individuazione di siti idonei alla realizzazione delle centrali.⁷ Nel 2010 la compagnia elettrica di stato polacca, la Polska Grupa Energetyczna, ha firmato un accordo con la compagnia francese Électricité de France per una indagine congiunta per la realizzazione del progetto atomico nazionale. Francia e Polonia hanno quindi firmato una dichiarazione congiunta sull'energia: la Francia si impegnerà nell'aiuto della Polonia per la realizzazione delle sue centrali.⁸ Nell'estate 2022, anche gli USA hanno mostrato interesse al progetto nucleare polacco, per via della situazione geopolitica e del deterioramento dei rapporti con la Russia. Nell'ottobre 2021, USA e Polonia hanno firmato un accordo di cooperazione di sviluppo nucleare e gli USA si sono dichiarati pronti, nel 2022, a fornire alla Polonia e ad altri paesi del centro e dell'est Europa i reattori e il supporto necessario per lo sviluppo nucleare. La Polonia si trova quindi a dover scegliere su quali tecnologie affidarsi, quelle francesi, quelle statunitensi o quelle della Corea del Sud (EuropeToday, 2022).

2.3 Il caso della Francia

La Francia è il paese con la percentuale di energia nucleare più alta prodotta, infatti, con le sue 19 centrali nucleari, dotate di 58 reattori operativi, è capace di coprire quasi il 70% del suo fabbisogno.⁹ Lo Stato francese, a partire dagli anni '70 dello scorso secolo,

⁶ Approfondimento sui danni causati dal disastro di Černobyl' nei paesi dell'UE, Commissione Europea, 2006.

⁷ World nuclear news, 2010.

⁸ World nuclear news, 2010.

⁹ IAEA, PRIS database, Nuclear Power Plant Information, 2021.

ha visto nel nucleare una opportunità energetica oltre che militare. L'obiettivo dei vari governi che si sono succeduti era quello di raggiungere una sempre maggiore indipendenza energetica, la necessità ancor più motivata dalla crisi energetica del 1973. Tra l'inizio degli anni '70 e la prima metà degli anni '80 quindi, la Francia realizza 32 reattori nucleari e arriva ad averne 57 entro la fine degli anni '90. Oltre a essere un grande produttore di energia nucleare, la Francia è uno dei leader mondiali per innovazione nel campo del nucleare. Le centrali nucleari francesi operano infatti per ciclo chiuso, ovvero basano la loro produzione di energia sul riprocessamento del combustibile utilizzato, riuscendo a ricavare circa il 30% di energia in più rispetto a un ciclo aperto. Come si spiegherà più avanti, il riprocessamento del combustibile, oltre a essere un meccanismo di riciclo, e quindi di risparmio monetario, è un sistema che consente di produrre meno scorie.

Dagli anni 2000 in poi, i governi che si sono succeduti non hanno cambiato la loro visione sul nucleare, considerandolo come fonte di energia insostituibile e cardine per il mix energetico del paese. La prospettiva della Francia è diventata quella di divenire uno dei principali esportatori, sia di energia elettrica prodotta da energia nucleare che di tecnologie. Nel 2001 infatti nacque la multinazionale AREVA con l'obiettivo di unire in un'unica azienda la maggior parte delle attività nucleari, dalla gestione dei reattori all'arricchimento, dallo stoccaggio dei rifiuti al riprocessamento. La multinazionale aveva anche l'obiettivo di divenire il faro per l'innovazione nucleare mondiale, per questo investì nella realizzazione di un nuovo tipo di reattore, soprannominato EPR, reattore di terza generazione ad acqua pressurizzata. Così nel 2009 l'ENEL iniziò a investire nei progetti di AREVA e le due aziende stipularono un accordo per lo studio di fattibilità di 4 reattori EPR in Italia, ma il referendum del 2011 pose fine al progetto (Baguenier, 2019). La realizzazione di questi reattori non fu ottimale neanche in Francia: a oggi ne sono stati realizzati 6, tutti con enormi ritardi e con costi che sono risultati superiori a quelli preventivati. La difficoltà nella realizzazione di questi reattori, unita a un disinteresse mondiale nei confronti del nucleare nella seconda decade degli anni 2000, fece naufragare il progetto di divenire leader mondiali incontrastati nella esportazione tecnologica nucleare. Nonostante questo insuccesso, l'opinione pubblica francese rimane an-

cora oggi saldamente dell'idea che il nucleare sia fondamentale per il mix energetico del paese. Quasi la totalità dei partiti francesi, da destra a sinistra, è favorevole al nucleare.

Il presidente Macron, nel 2022, ha annunciato un nuovo programma nucleare per la realizzazione di 14 nuovi reattori nucleari di terza generazione. La convinzione del presidente francese è quella di puntare nuovamente all'esportazione della tecnologia nucleare nel mondo; questa convinzione è supportata dall'esigenza di energia *green*, sia nei paesi più industrializzati, sia nei paesi in via di sviluppo e, per quanto riguarda l'Europa, per via della necessità di rendersi indipendenti dal gas naturale e dal petrolio russi (Sassi, 2022).

Nonostante il relativo fallimento del progetto EPR, la Francia rimane uno dei maggiori esportatori di tecnologie atomiche del mondo; sono numerosi i reattori francesi installati fuori dai loro confini, nello specifico 2 in Sudafrica, 2 in Corea del Sud, 4 in Cina, 2 in Iran, 1 in Finlandia e 2 in UK.

La Francia risulta essere oggi uno dei paesi che immettono meno CO₂ nell'atmosfera per la produzione di energia elettrica, questo è ovviamente dovuto all'utilizzo dell'energia nucleare come fonte di energia.¹⁰

La Francia, oltre a essere, in proporzione, il più grande produttore di energia nucleare nel mondo, utilizza l'energia nucleare come deterrente bellico, ciò vuol dire, secondo la tradizione politica francese, ritenere le armi atomiche uno strumento politico, necessario non a vincere le guerre ma a prevenirle. Questa dottrina del *dissuasion du faible au fort* viene ancora oggi supportata dalla classe politica francese,¹¹ come testimonia il discorso di Cherbourg tenuto nel 2008 dal Presidente della Repubblica francese Nicolas Sarkozy.¹²

¹⁰ Dati riferiti a *electricitymaps*, mappa europea aggiornata sulle emissioni di CO₂ per Kw/h di energia consumata o prodotta.

¹¹ Teoria risalente agli anni '60 dello scorso secolo. Il generale Gallois riteneva necessario che le armi atomiche francesi incutessero il giusto timore nell'Unione Sovietica: attaccare la Francia avrebbe significato essere distrutti di conseguenza, nonostante il divario di potenziale bellico.

¹² Discorso in cui il presidente Sarkozy, nel 2008, riaffermò quanto fosse cruciale per l'equilibrio dell'ordine mondiale e per la sicurezza nazionale che la Francia detenesse un arsenale nucleare.

2.4 Altri paesi leader nel campo del nucleare: Russia, Cina, Corea del Sud e Stati Uniti

Lo sviluppo della tecnologia nucleare impiegata per uso civile risale, in Russia, alla prima metà degli anni '50 del secolo scorso ed è indissolubilmente legata al programma nucleare bellico dell'Unione Sovietica. Fu inaugurato infatti, nel 1954, il primo reattore energetico nucleare al mondo nella centrale di Obninsk, adibita negli anni precedenti come centrale per la produzione di plutonio per le armi atomiche (Virtuani, 2014). Nella prima metà degli anni '80, l'intera Unione Sovietica contava 25 reattori, e prevedeva di costruirne di nuove, ma l'incidente alla centrale nucleare di Černobyl' e la crisi economica dovuta poi alla dissoluzione dell'Unione Sovietica rallentarono il programma nucleare civile; così dal 1980 al 1993 fu realizzata soltanto una centrale nucleare. Dagli anni 2000 in poi, la Russia si propone come uno dei principali esportatori di tecnologia per la produzione di energia nucleare. Questa posizione è garantita negli anni dagli investimenti fatti dallo Stato e dalla Rosatom, azienda di Stato che si occupa della gestione di tutto il processo di produzione di energia nucleare in Russia. I campi in cui l'ingegneria nucleare russa è leader sono: il riprocessamento del combustibile nucleare, che consente alle centrali nucleari russe di riutilizzare i materiali derivanti da una fissione; i reattori cosiddetti veloci, chiamati così per via del loro funzionamento, in quanto utilizzano neutroni veloci e non neutroni termici, come nelle centrali termonucleari, per la fissione degli atomi di uranio e plutonio. La Russia è anche un buon produttore ed esportatore di uranio: oltre a rifornire e ad aver rifornito i suoi 76 reattori, fornisce altre centrali nel mondo. La compagnia russa Rosatom, attraverso contratti con compagnie nazionali straniere, vende i propri reattori e fornisce supporto per studi di fattibilità e per la realizzazione degli impianti. Sono molti i paesi che si sono rivolti alla Russia e a Rosatom per realizzare le proprie centrali, tra questi l'Egitto (Greenreport, 2022), l'Ungheria (Agi, 2022), l'Ucraina, la Cina, la Turchia, l'India, la Bielorussia, il Bangladesh, l'Iran, la Finlandia e l'Armenia.

L'innovazione russa non si ferma alle centrali nucleari convenzionali, è infatti di produzione russa la prima centrale nucleare galleggiante. Altro non è che una particolare imbarcazione adibita a centrale nucleare. Ultimata nel 2019, avrà il compito di rifornire

di energia zone della Siberia altrimenti difficilmente rifornibili e sarà essenziale, secondo i progetti russi, per far divenire il paese un leader nell'esplorazione e nel controllo delle rotte mercantili nell'area artica del pianeta, tutt'oggi contese tra USA, Cina, Giappone e la stessa Russia.¹³

Oggi la Russia, con tutti i suoi 37 reattori attivi, copre quasi il 20% del suo fabbisogno energetico e sono tutt'oggi in corso opere di costruzione per altri 4 reattori nel paese,¹⁴ a dimostrazione di quanto il progetto nucleare sia importante per l'amministrazione di Putin e per l'intera Russia, nonostante la maggior parte del suo fabbisogno energetico sia soddisfatto dal gas naturale, di cui la Russia è tra i maggiori produttori ed esportatori al mondo.¹⁵

La Cina, come molte potenze militari nel mondo, ha avviato dapprima il suo programma nucleare bellico per poi aprirsi al nucleare civile. La Cina ebbe il suo primo test positivo di un'arma nucleare nel 1964 (Rampini, 2004) e decise di investire nel nucleare come fonte di energia a partire dal 1970, anno in cui venne fondato l'istituto 728 con il compito di studiare la possibilità di implementare l'energia nucleare nel paese. Il primo reattore nucleare in Cina venne ultimato nel 1985 con l'ausilio della Francia, infatti si trattava di un reattore PWR di produzione francese. Dal 1985 in poi, furono realizzati numerosi reattori e la Cina cominciò anche a produrne e installarne di propri. Dopo l'incidente di Fukushima, anche in Cina l'opinione pubblica cominciò ad aver timore del nucleare e dei potenziali rischi che questo comporta, ma nonostante lo scetticismo, la necessità di una risposta al cambiamento climatico, la necessità di decarbonizzare il sistema produttivo e la sempre più crescente richiesta di energia hanno spinto il Partito comunista cinese ad attuare un piano di investimento sul nucleare che aspira a incrementare fortemente la produzione di energia nucleare nel paese grazie alla realizzazione di nuovi reattori (Moles, 2022).

Oltre a investire nella produzione interna, la Cina ha anche l'obiettivo di diventare leader nell'esportazione di tecnologia nucleare, soprattutto nel sud del mondo, entrando

¹³ Interessante articolo sul ruolo della prima centrale galleggiante russa nel controllo dell'artico. Di L. Pagni, 2021.

¹⁴ World nuclear, 2021.

¹⁵ IAEA, PRIS database, Nuclear Power Plant Information, 2021.

in competizione con Russia e Corea del Sud; sono infatti in via di realizzazione numerosi reattori nucleari cinesi nel mondo e tra i paesi che ha deciso di dotarsi di questi ultimi vi è la Gran Bretagna (Fatiguso 2022).

La Cina è il secondo tra i maggiori produttori di energia nucleare al mondo dopo gli USA, però copre con i suoi 53 reattori solo il 5% del suo fabbisogno energetico.¹⁶

La Corea del Sud inizia il suo percorso nella produzione di energia nucleare alla fine degli anni '70 dello scorso secolo per ovviare alla crescente richiesta di energia nel paese. Per via della sua storia recente e dell'influenza statunitense nel mercato sudcoreano, i primi reattori installati nella prima centrale nucleare coreana, quella di Kori, sono di produzione americana. La politica coreana però, per via della posizione del paese nel continente asiatico e per via della sua vicinanza ideologica agli USA, ha spinto molto, alla fine dello scorso secolo, per una maggiore indipendenza del settore energetico coreano. Furono siglati, tra il 1987 e il 1997, accordi con la compagnia americana Combustion Engineering, oggi Westinghouse, per un maggior coinvolgimento delle imprese e dell'industria coreana nella realizzazione dei reattori nucleari coreani. Questo processo di standardizzazione di produzione coreano ha portato il paese a divenire un punto di riferimento nell'esportazione di tecnologia nucleare nel mondo. Sono molti i paesi del Medio Oriente, dell'America latina e dell'Africa che hanno siglato accordi con la compagnia coreana KEPCO per la vendita di reattori nucleari. Gli Emirati Arabi, ad esempio, hanno stipulato nel 2009 un contratto con KEPCO per la realizzazione di 4 reattori nucleari nel paese, il primo dei quali ultimato nel 2017.¹⁷

Oggi la Corea del Sud, con i suoi 25 reattori in funzione, soddisfa il 28% del suo fabbisogno energetico.¹⁸

Gli Stati Uniti sono oggi la nazione che produce più energia elettrica dalla fissione nucleare; grazie a 94 reattori produttivi ha soddisfatto, nel 2021, quasi il 20% del suo fabbisogno energetico.

¹⁶ IAEA, PRIS database, Nuclear Power Plant Information, 2021.

¹⁷ World nuclear, 2021.

¹⁸ IAEA, PRIS database, Nuclear Power Plant Information, 2021.

Il programma nucleare statunitense affonda le sue radici negli anni '50 del Novecento con la realizzazione delle prime centrali nucleari nel paese; una di queste portava il nome dello scienziato italiano Enrico Fermi che, grazie ai suoi studi, contribuì alla realizzazione del primo reattore nucleare sperimentale della storia e per questo gli fu assegnato il Premio Nobel nel 1938. Tra gli anni '50 e '70 il programma nucleare del paese vive una grande espansione, ma a seguito dell'incidente della centrale di Three Mile Island,¹⁹ in Pennsylvania, nell'opinione pubblica calò molto il consenso nei confronti del nucleare. A rallentare la nuclearizzazione del paese, oltre al crescente malcontento, fu però l'investimento da parte di settori privati e pubblici sull'estrazione e lo sfruttamento dei combustibili fossili, più facili da reperire e più velocemente trasformabili in energia elettrica rispetto al nucleare che ha bisogno di lunghi tempi per la sua realizzazione e, non avendo grandi giacimenti di uranio nel proprio territorio, gli Stati Uniti sono costretti a importarlo da Canada, Australia e Kazakistan. Nonostante il rallentamento del progetto nucleare, gli Stati Uniti hanno aumentato la loro produttività di energia elettrica nucleare, aumentando il contributo al mix energetico dell'energia atomica; miglioramento della condizione dovuto sia ai nuovi reattori installati negli anni, ma anche al progresso tecnologico che ha portato i nuovi reattori a essere più produttivi.

A partire dai primi anni del nuovo secolo, l'amministrazione statunitense, per via del crescere dei costi di produzione e di importazione dei combustibili fossili, per la necessità di ridurre l'emissione di gas serra e per il rallentamento degli investimenti sul nucleare, ha deciso di investire su fonti di energia con un ridotto impatto ambientale. È del 2005 infatti il Energy Policy Act, firmato dal presidente George W. Bush, attraverso il quale si decise di investire più di 13 miliardi di dollari sulla produzione energetica nucleare.²⁰

Della stessa idea fu il presidente Barack Obama che aggiunse ulteriori fondi per il rafforzamento del programma nucleare civile statunitense.²¹

¹⁹ Articolo interessante su ciò che avvenne alla centrale di Three Mile Island il 28 marzo 1979. Di Bonfranceschi, 2014.

²⁰ Energy Policy Act, US, 2005.

²¹ Informazioni reperite da: whitehouse.gov.

2.5 Storia del nucleare in Italia

Subito dopo la fine della seconda guerra mondiale si cominciò a pensare alla fissione nucleare come fonte di energia civile e non solo come arma. A seguito della conferenza di Ginevra del 1955, promossa dall'ONU per lo sviluppo pacifico dell'energia atomica, molti paesi, tra cui l'Italia, pensarono di investire nell'energia atomica. La prima centrale nucleare realizzata in Italia è quella di Latina (produzione da 216MW). I lavori per la sua realizzazione, finanziati dall'ENI, iniziarono nel 1958 e si conclusero con l'inaugurazione nel 1963. La seconda centrale nucleare venne realizzata in provincia di Caserta (da 150 MW), inaugurata nel 1964. La terza venne inaugurata nel 1965 in provincia di Vercelli (da 270 MW). A seguito dell'aumento del prezzo del petrolio dovuto allo shock petrolifero del 1973, iniziarono i progetti per la realizzazione di nuove centrali nucleari. Iniziarono quindi i lavori per la realizzazione di una nuova centrale nucleare in provincia di Piacenza. A seguito di rinvii e pressioni da parte dell'opinione pubblica, divenute sempre più consistenti a seguito dell'incidente nucleare negli USA, in Pennsylvania, nel 1979, questa centrale iniziò a produrre energia solo nel 1981 (850 MW).²²

Nel 1975 viene realizzato, dal quarto Governo Moro, il Piano Energetico Nazionale, approvato dal Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (CIPE). Tra le altre cose, prevedeva la realizzazione di nuove centrali nucleari; l'individuazione dei luoghi adatti alla realizzazione di queste centrali fu fatta tramite la Legge 393 del 1975. Le polemiche a seguito di questo piano furono molte, tanto che, nel 1977, ebbero vita molte proteste che spinsero il terzo Governo Andreotti a modificare il Piano Energetico Nazionale e a ridimensionare il piano atomico (Rivistaenergia, 2018).

Il disastro di Černobyl', con l'esplosione del Reattore 4 della centrale sovietica, nell'aprile del 1986, fece da catalizzatore per la rinuncia italiana all'utilizzo dell'energia nucleare.

Nel 1987 in Italia si tenne un referendum abrogativo promosso dal Partito Radicale, dal Partito Liberale Italiano e dal Partito Socialista Italiano al quale votarono circa il 65% dei cittadini aventi diritto; tre dei cinque quesiti posti chiedevano il parere degli elettori su delle norme che favorivano la creazione e l'utilizzo delle centrali nucleari. Il

²² Informazioni reperite sul sito ufficiale di Sogin.

quesito III chiedeva se si fosse d'accordo ad abrogare il 13° comma dell'articolo unico legge 10/1/1983 n.8 che conferiva al Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica la potestà di decidere dove localizzare le centrali nucleari. Il quesito IV chiedeva se si fosse d'accordo ad abrogare i commi da 1 a 12 della legge 10/1/1983 n.8 che prevedevano contributi per i comuni nei quali fossero presenti centrali nucleari. Infine, nel quesito V, veniva chiesto se si fosse d'accordo ad abrogare una norma contenuta nella legge n. 856 del 1973 che consentiva all'ENEL di partecipare, grazie ad accordi internazionali, alla creazione di centrali nucleari all'estero. Il referendum, in quanto abrogativo, non domandò se si fosse d'accordo sul nucleare o meno, ma con la vittoria del sì attestata intorno all'80%, la contrarietà al nucleare sembrò anche scontata, tanto da indurre l'allora Governo Gorla a interrompere il programma nucleare nazionale (Corriere della sera, 2009).

A partire dal 2008, durante il Governo Berlusconi IV, ci furono molti studi e iniziarono molti progetti per la realizzazione di nuove centrali nucleari. L'opposizione di molte regioni, associazioni, attivisti e partiti politici al progetto del Governo fu dura, ma la vera battuta d'arresto si ebbe nel 2011 con l'incidente alla centrale nucleare di Fukushima in Giappone a seguito di una forte scossa di terremoto che generò un maremoto. A seguito di questo evento furono indetti due referendum: uno consultivo solo in Sardegna, nel quale venne chiesto ai cittadini se fossero d'accordo con l'ipotesi di una o più centrali nucleari nella regione, e il 97% dei votanti votò a sfavore; il secondo, abrogativo a livello nazionale, chiedeva ai cittadini aventi diritto se volessero abrogare o meno i commi 1 e 8 dell'articolo 5 del decreto-legge 31/03/2011 n.34 che stimolavano la ripresa del programma nucleare nazionale, e anche in questo caso il risultato fu chiaro con il 94% dei votanti favorevoli all'abrogazione (Rivistaenergia, 2018).

Nel 2021 l'allora Ministro per la Transizione Ecologica italiano, Roberto Cingolani, in un intervento pubblico, ripropone l'idea di produrre energia nucleare in Italia sostenendo che, con il progresso tecnologico, si può produrre energia con le centrali nucleari in modo più *green* rispetto al petrolio e con meno rischi rispetto al passato, invitando gli oppositori del nucleare a non basare la loro opposizione solo sulle ideologie. Il ministro ha infatti spiegato che le centrali nucleari di ultima generazione non producono scorie e

acque contaminate come le vecchie centrali e non utilizzano, inoltre, l'uranio o il plutonio. Sarebbero, secondo l'allora Ministro, un modo più *green* per produrre energia e consentirebbe di aumentare il soddisfacimento del fabbisogno energetico del paese attraverso metodi non particolarmente inquinanti e con costi contenuti; una prospettiva allettante per la lotta al cambiamento climatico (Redazione di Open, 2021).

Nel 2022, a seguito dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia, e della conseguente quasi completa rottura dei rapporti economici con la Russia, principale fornitore di gas in Europa, il dibattito politico italiano, durante la campagna elettorale, si è concentrato molto sul tema dell'energia, dell'autosufficienza energetica e dell'energia pulita e sicura. La coalizione di centrodestra e il gruppo centrista "*terzo polo*" hanno inserito, nei loro programmi elettorali, proposte a favore della ripresa di produzione di energia nucleare nel territorio italiano (Romagnoli, 2022).

Il partito Fratelli d'Italia, nel suo programma elettorale del 2022, nella sezione 17 intitolata "*Energia pulita, sicura e a costi sostenibili*", oltre ad affrontare il tema del generale rincaro energetico, dovuto soprattutto alla situazione geopolitica, inserisce il nucleare solo in un'ottica di ricerca su nuove tecnologie per il futuro, senza quindi affermare di voler implementare questo tipo di fonte energetica nell'immediato futuro.²³

Il programma elettorale della Lega fa esplicitamente riferimento al nucleare come fonte di energia necessaria per il raggiungimento degli obiettivi di decarbonizzazione. Il programma però non specifica che tipo di investimento si vuol fare in tal senso, se quindi investire sulla ricerca del nucleare di IV generazione o implementare da subito i reattori di III generazione. Si fa anche riferimento a iniziative di investimento all'estero per la realizzazione di centrali nucleari fuori dai confini italiani per avere contratti di fornitura favorevoli.²⁴

Il partito Forza Italia, a differenza del programma di Fratelli d'Italia, inserisce all'interno del suo programma, anche se breve, una battuta sul tema del nucleare, dichiarando

²³ Fratelli d'Italia, programma elettorale 2022.

²⁴ Lega, programma elettorale 2022.

di essere sostanzialmente d'accordo alla realizzazione di impianti nucleari di *“ultima generazione”*, senza però specificare di quale generazione di nucleare si stia trattando.²⁵

Il programma del cosiddetto *“terzo polo”*, costituito dai partiti Italia Viva e Azione, presenta il tema energetico come terzo punto. L'energia nucleare si prospetta come una delle soluzioni per il raggiungimento dell'obiettivo della decarbonizzazione completa entro il 2050. Nel programma si fa riferimento alle *“migliori tecnologie disponibili”*, chiaro segnale di voler implementare l'utilizzo di reattori della generazione più recente disponibile. Rilevante risulta anche l'inserimento nel programma elettorale della modifica e adeguazione del quadro regolatorio del settore energetico, un passo fondamentale per l'eventuale realizzazione di nuovi impianti nucleari.²⁶

Andando oltre le mere proposte o intenzioni di investimento sulla ricerca, quello che rimane è un quadro confuso sulle quali siano le reali intenzioni dei partiti sul nucleare. Se da una parte il centrosinistra, Partito Democratico e i suoi alleati e Movimento 5 Stelle, appare compatto sul *“no”* al nucleare, proponendo alternative e piani energetici più o meno discutibili, dall'altra il centrodestra sembra decisamente propenso al *“sì”*, ma con scarse proposte materiali sulla realizzazione. Nessuno dei partiti favorevoli al nucleare ha proposto, ad esempio, un numero eventuale di centrali nucleari necessarie al soddisfacimento di una richiesta energetica che si farà sempre più crescente e di una diversificazione delle fonti che si sta profilando necessaria per l'Italia e per tutti i paesi europei. La coalizione Azione - Italia Viva, dal canto suo, sembra la più preparata sul tema del nucleare.

²⁵ Forza Italia, programma elettorale 2022.

²⁶ Azione - Italia Viva, programma elettorale 2022.

CAPITOLO III

SULLA SOSTENIBILITÀ DELL'ENERGIA NUCLEARE

In questo capitolo verranno esaminati gli aspetti più rilevanti sul nucleare per tentare di rispondere alla domanda: “Il nucleare è *green*?”. Verrà preso in esame il “*capacity factor*”, ovvero quel fattore con cui si valuta la capacità di produzione energetica effettiva di tutte le fonti energetiche. Si parlerà poi dei rifiuti radioattivi, della loro classificazione internazionalmente riconosciuta e di come questi vengano riprocessati oppure stoccati, affrontando anche il tema della sicurezza di questi rifiuti e della creazione del deposito nazionale. Si tratterà del tema della sicurezza nucleare: di come questa sia divenuta, dopo il disastro di Černobyl', di primo piano nei programmi nucleari e di come quella degli impianti nucleari sia ancora oggi fonte di preoccupazione per le agenzie nucleari internazionali. Verrà poi affrontato il tema dei costi che il nostro paese dovrebbe affrontare per sviluppare un programma nucleare nazionale: analizzando i costi temporali, dovuti al processo legislativo prima e alla burocrazia dopo; quelli economici dovuti, ad esempio, alla dilatazione dei tempi di realizzazione che fanno lievitare in maniera imponente i costi finali dei singoli impianti; e infine quelli politici, soffermandosi sull'importanza di creare una cultura sul nucleare prima di intraprendere nuovamente questa strada. Si approfondirà la storia dei reattori nucleari, passando in rassegna le caratteristiche delle varie generazioni che negli anni si sono succedute, soffermandosi sui reattori di “quarta generazione” e sugli Smart Modular Reactors, le prospettive future della fissione nucleare. Si parlerà poi del fabbisogno energetico interno italiano, di quanti reattori e di quali reattori avrebbe bisogno l'Italia ipoteticamente per sostituire qualsiasi altra fonte energetica e, più verosimilmente, di quanti reattori avrebbe bisogno per sostituire il gas naturale nel mix energetico, tema attuale per via della situazione in-

ternazionale e le crescenti frizioni con la Russia, principale esportatore di gas naturale in Europa. Verrà infine approfondito il tema della fusione nucleare, quello che sembra essere il futuro dell'energia elettrica mondiale per via della capacità di produrre energia elettrica da un fenomeno che, a differenza della fissione, è rinnovabile, inquina di meno, e non produce né CO₂ né altri gas serra né scorie con lunga decadenza.

3.1 Il “*capacity factor*”: la produttività energetica reale e potenziale del nucleare

L'utilizzo della fissione nucleare dell'isotopo ²³⁵U, comunemente noto come uranio arricchito, per la produzione energetica è proporzionalmente molto più efficiente di tutti gli altri tipi di produzione energetica utilizzati dall'uomo. Questa affermazione è facilmente verificabile analizzando il *capacity factor* dei singoli sistemi di produzione energetica. Il *capacity factor* è il rapporto percentuale tra la potenza effettiva di una risorsa energetica e la sua potenza nominale, sostanzialmente la percentuale di energia prodotta rispetto alla quantità massima producibile. Ogni risorsa ha quindi una sua produttività potenziale e una sua produttività reale. La produzione di energie rinnovabili presenta il limite dell'irregolarità con cui le fonti si manifestano per essere sfruttate; a seconda poi della zona in cui si decide di investire per produrre energia rinnovabile, la capacità produttiva reale varia. La produzione di energia nucleare invece non risente particolarmente di condizioni esterne al reattore nucleare, la variazione di produttività è di molto inferiore a quella di tutte le altre forme di produzione, comprese quelle da risorse fossili.

Secondo uno studio svolto nel 2018 sulla produzione energetica negli UK nel 2016, si stima che il valore della produzione reale di energia eolica si attesti intorno a 2,4GW annui, a fronte di una capacità potenziale di 14,5 GW, con un *capacity factor* quindi del 32%; per contro l'energia nucleare presenta una capacità reale di 7,6GW su una capacità potenziale di 8,9 GW, con un *capacity factor* dell'85%. Questo dato giustifica la scelta di molti paesi nel produrre energia nucleare. Oggi l'essere umano riesce quindi a sfruttare di più l'uranio rispetto alle fonti rinnovabili.

Una centrale nucleare ha una capacità potenziale di produttività di 1,6 GW, pari a 250 pale eoliche o a 8 Km² di pannelli fotovoltaici.¹

3.2 Lo smaltimento dei rifiuti radioattivi: lo stoccaggio, il riprocessamento delle scorie e i pericoli di infiltrazioni malavitose

Per rifiuti nucleari si intendono tutte le sostanze di scarto provenienti dalla fissione contenenti isotopi radioattivi e che non possono essere riutilizzate. I rifiuti nucleari comprendono parti di combustibile esausto, comunemente chiamate scorie, spesso si tratta di parti residue troppo piccole per poter essere fisse e altri materiali contaminati utilizzati per la fissione, per il trasporto o per l'arricchimento. Va anche specificato che la produzione di scorie radioattive non avviene solo nelle centrali nucleari, ma avviene in campo medico e per la produzione delle terre rare.

Le scorie radioattive sono classificate, secondo la classificazione dell'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica del 1981, in tre distinte categorie:

- LLW, rifiuti a bassa attività: rifiuti che non possono essere catalogati come comuni rifiuti per via della loro radioattività, ma che per la stessa, ritenuta non elevata, non è richiesta alcuna schermatura particolare per il trasporto;
- ILW, rifiuti ad attività intermedia: rifiuti che richiedono una schermatura ma nessun meccanismo di raffreddamento;
- HLW, rifiuti ad alta attività: rifiuti con una radioattività abbastanza elevata da richiedere di essere raffreddati in quanto il decadimento radioattivo genera calore.²

In Italia si usa una categorizzazione simile ma come termine di paragone non viene utilizzata la radioattività dei rifiuti ma il tempo di decadenza.³

¹ Ulteriori approfondimenti scientifici sul *capacity factor*, supportati da esperimenti e dati su sciencedirect.com.

² Classificazione originale dei rifiuti radioattivi realizzata da IAEA, 1981.

³ Deposito nazionale: Classificazione dei rifiuti radioattivi edita dal Ministero Dell'ambiente E Della Tutela Del Territorio E Del Mare con Decreto 7 agosto 2015, 2015.

Lo smaltimento dei rifiuti LLW, che solitamente sono elementi leggermente contaminati, come i filtri dell'acqua dei reattori, vengono stoccati all'incirca un anno in depositi speciali, dopo tale decorrenza vengono smaltiti come rifiuti comuni.

I rifiuti ILW e HLW in quasi tutti paesi vengono smaltiti alla medesima maniera per via degli elevati costi che avrebbe una differenziazione di processo. La Francia è l'unico paese che ha due processi di smaltimento differenti: per i rifiuti ILW si segue una prassi simile a quella utilizzata per i rifiuti LLW, ma con tempistiche molto più lunghe e con necessità di schermature.

Lo smaltimento dei rifiuti HLW può essere eseguito in due modi differenti. Entrambi prevedono una schermatura che può essere data o dagli stessi siti di stoccaggio posti in profondità nel sottosuolo o da appositi depositi adeguatamente schermati posti in superficie. Il primo procedimento, di cui ad esempio la Finlandia fa uso, è scarsamente utilizzato per via della difficoltà nel trovare siti idonei allo stoccaggio; servono infatti zone a basso rischio sismico in cui costruire siti di stoccaggio sotterranei con tipi di sedimenti e terreni soprastanti capaci di schermare ogni tipo di radiazione.⁴

Le barre di uranio utilizzate per la fissione nucleare possono essere riprocessate. Questa procedura non è percorribile per tutti i tipi di reattori nucleari, molti infatti sono di tipo "once-through" e hanno quindi bisogno di combustibile vergine. Il riprocessamento consiste nel riutilizzo di alcune sostanze risultanti dalla fissione di una barra di uranio. Una barra di uranio costituita da un 5% di ^{235}U , uranio fissile, e da un 95% di ^{238}U , uranio non fissile, una volta esausta risulterà essere composta da un 92% di ^{238}U , da un 5% di altri prodotti di fissione, da un 1,5% di ^{235}U e da un 1,5% di ^{239}Pu fissile. Il riprocessamento consente quindi di riutilizzare il ^{239}Pu e l' ^{235}U , riducendo quindi anche la presenza di scorie con un lungo decadimento dai rifiuti nucleari. Questo procedimento è utilizzato dalla Francia e dalla Russia nei loro programmi atomici (AIN, 2021).⁵

⁴ Guida IAEA sullo stoccaggio dei rifiuti nucleari, 2021.

⁵ World-nuclear, 2020. Dati scientifici sul riciclo delle barre di uranio.

In Italia i rifiuti nucleari vengono messi in sicurezza e stoccati da Sogin, società statale che si occupa, oltre allo smaltimento dei rifiuti radioattivi, dello smantellamento degli impianti nucleari italiani e della ricerca medica nucleare.⁶

I rifiuti radioattivi oggi sono stoccati in diversi siti in Italia, ma è in via di ultimazione il progetto del deposito nazionale, gestito da Sogin, dove verranno stoccati tutti i rifiuti radioattivi italiani. Avrà una capacità di smaltire circa 78 mila metri cubi di rifiuti a bassa attività e di stoccare circa 17 mila metri cubi di rifiuti a media e alta attività.⁷

Se da un lato, però, i rifiuti radioattivi provenienti dalla produzione di elettricità devono seguire processi rigidi per il loro smaltimento, diversa è la storia dei rifiuti radioattivi derivanti dalla produzione industriale e medica.

A partire dalla prima metà degli anni '90, infatti, in Italia si cominciò a indagare su presunti traffici illeciti di materiale radioattivo. Legambiente, con un report del 1995, intitolato “*Rifiuti radioattivi: il caso Italia*”, presenta i risultati di anni di ricerche, denunce e indagini svolte sul tema dello smaltimento illegale e incontrollato di scorie nucleari nel Mar Mediterraneo, sia in acque internazionali che in acque italiane, e in varie aree italiane, come da esempio in Calabria.

Il report di Legambiente mostrava come alcuni imprenditori italiani, a partire dagli anni '80, grazie anche al favoreggiamento della 'ndrangheta calabrese, riuscissero a caricare su delle navi fantasma numerose tonnellate di scorie radioattive prodotte in vari stabilimenti industriali italiani, europei ed extraeuropei, per poi provocare affondamenti, all'apparenza casuali, delle suddette navi lungo le coste del Mar Mediterraneo. Lo stesso report cita alcune denunce sporte alle forze dell'ordine da dei testimoni che sono entrati in contatto con i rifiuti riemerso grazie alle correnti e che dal contatto con questi sono stati avvelenati: è il caso, ad esempio, di due pescatori del catanzarese che, durante una battuta di pesca, tirarono con la rete una “*palla di fango*” che causò loro dapprima bruciore agli arti e agli occhi e, successivamente, la morte per una rara forma di leuce-

⁶ Breve approfondimento su Sogin, chi sono e come lavorano.

⁷ Sul Deposito Nazionale, 2022, Sogin.

mia. Lo smaltimento illecito di rifiuti tossici e radioattivi, operato da imprenditori italiani, non si fermava soltanto al Mar Mediterraneo (Legambiente, 1995).⁸

La stessa Legambiente, in un report del marzo 2021, afferma che molti dei siti di stoccaggio per i rifiuti nucleari derivanti da produzione energetica presenti sul territorio italiano non sono idonei e presentano criticità di sicurezza: dei 24 siti di stoccaggio, alcuni dei quali si trovano dove sorgevano le centrali nucleari attive lo scorso secolo, ben 15 presenterebbero criticità di vario tipo.⁹

3.3 Sicurezza nucleare

Il tema della “sicurezza nucleare” investe non solo la produzione energetica, ma anche il settore medico, il settore industriale, quello militare e quello minerario; infatti in tutti questi campi è possibile far uso di sostanze radioattive e di conseguenza produrre rifiuti radioattivi che necessariamente devono essere smaltiti in maniera differente rispetto ai rifiuti convenzionali.

Per quanto riguarda il settore della produzione di energia nucleare, la sicurezza risulta essere di estrema necessità per l'opinione pubblica soprattutto a seguito del disastro nucleare di Černobyl' del 1986 che, oltre ad aver causato 65 vittime per via della contaminazione da radiazioni immediatamente dopo l'esplosione, ne ha causate numerose altre per il decadimento radioattivo dovuto alla deflagrazione del reattore 4 della centrale dovuta all'eccessivo vapore.¹⁰ Il disastro di Černobyl', dovuto in parte a errori umani e in parte a errori strutturali e di fabbricazione, ha portato ad adottare, negli anni, nuovi sistemi di sicurezza e accorgimenti di realizzazione degli impianti nucleari volti a evitare che quello che accadde nel 1986 possa accadere di nuovo. Per rispondere a questa esigenza, vennero realizzati nuovi tipi di reattori chiamati di terza generazione. Nella loro realizzazione, questi reattori prevedono, ad esempio, la struttura di contenimento realizzata attorno al reattore, chiamata anche edificio di contenimento, che, in caso di

⁸ CGIL Emilia Romagna, *Le navi a perdere di Francesco Fonti*, 2020. Ulteriori e interessanti approfondimenti sulla storia del traffico e dello smaltimento illecito di rifiuti radioattivi nel Mediterraneo e in Somalia.

⁹ Report sui siti di stoccaggio e smaltimento italiani, Legambiente 2021

¹⁰ Interessante articolo sulle stime delle vittime a lungo termine del disastro di Černobyl', Sturloni, 2019.

incidente all'interno di un reattore, non permette al vapore causato dal raffreddamento del reattore di esplodere e lasciare scoperto il nocciolo come accadde a Černobyl'. Questa struttura consta di diverse barriere di contenimento (Castelberry, 2021):

1. il primo strato di barriera è una lega di zirconio che avvolge l'uranio;
2. il secondo strato di barriera è il rivestimento in acciaio del reattore;
3. il terzo strato di barriera è l'edificio di contenimento realizzato attorno al reattore;
4. il quarto strato di barriera è la zona di esclusione fuori l'edificio.

Un altro fenomeno particolarmente rischioso per il quale la ricerca scientifica sta lavorando è quello della fusione del nocciolo, fenomeno chiamato anche “*corium*”. La fusione del nocciolo, seppur prevenibile con opere di raffreddamento del reattore, è considerato l'evento più pericoloso che può verificarsi in una centrale nucleare. Una possibile soluzione a un eventuale fusione del nocciolo potrebbe essere la tecnologia “*in vessel retention*” o IVR, che consiste nella creazione di un apposito contenitore particolarmente resistente e capace, con buone probabilità, di schermare dalle radiazioni e dalle elevatissime temperature del nocciolo fuso di un reattore. Sebbene questa tecnologia risulti potenzialmente efficace per prevenire il “*corium*” e sia stata già implementata in diverse centrali nucleari di potenza inferiore a 1.000MWe, rimane ancora in fase di ricerca e sperimentazione per l'implementazione nelle centrali più potenti. Nella situazione attuale sembra che più grande e potente sia il reattore meno il sistema IVR sia efficace, questo per via della concentrazione di diversi materiali presenti nel reattore che favoriscono o meno il funzionamento del sistema.¹¹

Risale al 1957 la fondazione della IAEA e l'istituzione dell'EURATOM. Entrambe le organizzazioni, la prima nata in seno all'ONU e la seconda in Europa, nascono per rispondere all'esigenza di demilitarizzare l'impiego delle risorse nucleari e migliorare gli standard di sicurezza dell'industria energetica nucleare. Fu il presidente americano Dwight D. Eisenhower, nel 1953, con il discorso che prese il nome di “*Atoms for peace*”, a chiedere l'istituzione di un'agenzia che regolasse l'utilizzo dell'energia ato-

¹¹ Interessante resoconto sulla ricerca coordinata dall'Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire sul tema dell'IVR. Di CORDIS European Commission, 2019.

mica nel mondo (Eisenhower, 1953). Iniziarono così i lavori per la stesura dello statuto della IAEA; si conclusero nel 1956, presso la sede ONU, con la votazione dello stesso. Furono 81 le nazioni che votarono unanimemente per l'adozione dello statuto e di fatto per la nascita della IAEA (IAEA, 2016).

Oltre alla sicurezza nucleare, i compiti dell'EURATOM sono:

- sviluppo tecnologico e diffusione delle conoscenze sull'energia nucleare;
- agevolazioni negli investimenti e nella realizzazione degli impianti nucleari in UE;
- garanzia, a tutti i paesi che producono energia nucleare, di un adeguato approvvigionamento di combustibili nucleari;
- garanzia che i programmi nucleari civili non vengano destinati ad altri scopi, nello specifico militari;
- promozione di uno sviluppo pacifico del nucleare;
- Costruzione di imprese nucleari comuni.

Nonostante tutti i paesi dell'UE facciano parte dell'EURATOM e nonostante entrambe le organizzazioni condividano lo stesso organismo di potere esecutivo, ossia quello della Commissione Europea, le due organizzazioni rimangono due entità diverse.¹²

La IAEA e l'EURATOM, oltre a fornire ai vari paesi diversi tipi di regolamentazioni per operare nel modo più sicuro possibile, vigilano sullo stato di sicurezza degli impianti nucleari nei paesi che ne hanno ratificato l'istituzione.

Esempio di questo ruolo fondamentale ne è la missione internazionale della IAEA presso la centrale nucleare ucraina di Zaporizhzhia nell'estate del 2022, durante il conflitto tra Russia e Ucraina. La centrale nucleare, la più grande d'Europa, si trova sotto il fuoco incrociato dei missili dei due eserciti, i cui vertici tentano di far ricadere le responsabilità all'altra fazione. Nei primi giorni di settembre 2022, dopo numerose settimane di tentativi e inviti da parte della comunità internazionale alle due parti per far iniziare in sicurezza l'operazione di monitoraggio da parte della IAEA, gli addetti ai lavori

¹² Trattato che istituisce la Comunità europea dell'energia atomica (Euratom), 2007.

dell'agenzia sono riusciti a raggiungere la centrale e a iniziare l'operazione di controllo (Euronews, 2022). Il resoconto del monitoraggio è tutt'altro che rincuorante. Secondo il comunicato della IAEA, la situazione nella centrale di Zaporizhzhia è estremamente pericolosa: sono stati danneggiati numerosi edifici e alcune esplosioni si sono verificate proprio in prossimità dei reattori della centrale. Nello stesso comunicato si invita a creare una zona di sicurezza attorno all'area della centrale e a continuare le operazioni di esercitazione per prevenire il disastro. L'agenzia inoltre assicura che nella centrale rimarrà del personale per continuare l'opera di monitoraggio (SkyTG24, 2022).

La situazione della centrale di Zaporizhzhia, a circa un mese di distanza dal sopralluogo della IAEA, rimane pressoché invariata: nonostante i reattori siano stati spenti, rimane alta la tensione per via della massiccia presenza di mezzi armati russi nell'area della centrale e per via dei continui attacchi che si verificano nell'area; secondo gli scienziati, infatti, il rischio di un disastro nucleare è ancora un pericolo reale (Cremonesi, 2022).¹³

Affermare che le centrali nucleari e i siti nucleari possano divenire, in caso di conflitto bellico, degli obiettivi sensibili non è del tutto fuori luogo, oggi più che mai, nonostante siano già presenti esempi di questo pericolo nella storia (Gregory, 2009).¹⁴ Sembra inoltre possibile affermare che nonostante esistano diverse agenzie internazionali con il compito di intervenire in situazioni particolarmente delicate e pericolose, come le minacce belliche ai siti nucleari, queste abbiano ben poco potere reale di prevenzione di un disastro. Sembrano avere più importanza, in questi casi, il buon senso e la deterrenza bellica, piuttosto che i trattati e le agenzie internazionali.

Il disastro nucleare di Černobyl' del 1986 è il più celebre e distruttivo fino a oggi verificatosi. Come già detto, furono numerose le vittime nelle settimane successive all'incidente e quelle che, per via dell'esposizione alle radiazioni, hanno sviluppato tumori e patologie gravi. Va ricordato poi il disastro di Fukushima del 2011, in Giappone, per il quale vi è a oggi solo una vittima accertata (BBC, 2018). Oltre ai due sopracitati sono

¹³ Situazione sulla centrale di Zaporizhzhia aggiornata al 25 settembre 2022.

¹⁴ Articolo sulle minacce di attacchi missilistici da parte dell'Azerbaijan nei confronti delle centrali nucleari in Armenia. Di Heil A., 2020.

stati però numerosi gli incidenti nucleari che hanno interessato diversi impianti nucleari del mondo. Dopo il disastro di Černobyl' del 1986, sono stati infatti molteplici i piccoli incidenti che hanno causato dispersione di gas e liquidi altamente radioattivi nell'atmosfera, causando spesso feriti. Molti di questi incidenti sono stati causati da difetti di costruzione, danni non immediatamente riparati o dalla posizione poco sicura in cui sono stati progettati ed edificati alcuni impianti nucleari. Questo è il caso dell'incidente della centrale nucleare di Kashiwazaki verificatosi nel 2007 a seguito di un terremoto, che, secondo l'allora direttore della AIEA, fu più forte del massimo tollerabile dalla centrale. I danni alla struttura hanno portato alla fuoriuscita di 1.200 litri di acqua altamente radioattiva che si sono riversati nel Mar del Giappone (Legambiente, 2007). Successivamente fu scoperto che la centrale venne realizzata sopra una faglia attiva. Un altro incidente, ad esempio, è quello accaduto nella centrale francese di Tricastin, nel 2008, in cui 75Kg di uranio in soluzione acquosa sono stati accidentalmente versati in un fiume vicino. Per diversi giorni i livelli di radioattività nei corsi d'acqua della zona furono abbastanza elevati da imporre un divieto alla popolazione, da parte dell'autorità locale competente, di bere l'acqua di tre fiumi, pescare, nuotare e praticare altre attività acquatiche (France24, 2008).

Sebbene la sicurezza degli impianti nucleari debba essere garantita da regolamenti via via sempre più stringenti, vincolanti e all'avanguardia, può capitare che si verifichi un incidente per via di un errore umano o per cause di forza maggiore, come eventi naturali imprevedibili e dalla forza distruttiva talvolta smisurata. I casi di questa fattispecie risultano a oggi numerosi e non trascurabili, e per molte volte si è sfiorato un disastro nucleare potenzialmente molto pericoloso e distruttivo.

Un dato che rimane comunque interessante è quello relativo al tasso di morte per incidenti e inquinamento del nucleare rapportato alle altre fonti di energia. I dati mostrano come, per un TWh di energia prodotta, è possibile individuare quante morti ne conseguono per via indiretta o diretta:¹⁵

¹⁵ I dati relativi alle varie fonti di energia considerano al loro interno anche i disastri e gli incidenti legati alla produzione di energia elettrica, quindi comprendenti anche il disastro di Černobyl'. Di Ritchie H., 2020.

- il carbone impiegato per la produzione di un TWh, per via l'immissione nell'atmosfera di CO₂ o per incidenti legati alla sua produzione o combustione, causa il decesso di 24,6 persone;
- il petrolio, per le stesse motivazioni, ne causa 18,4;
- le biomasse 4,6;
- il gas naturale 2,8;
- l'energia idroelettrica 1,3;
- l'energia eolica 0,04;
- l'energia nucleare 0,03;
- L'energia solare 0,02.

3.4 Costi di produzione di energia nucleare

Il tema dei costi generali di realizzazione di una o più centrali nucleari è sicuramente uno dei più importanti da affrontare, soprattutto in un paese, come l'Italia, in cui si dovrebbe ripartire quasi da zero per la realizzazione di centrali nucleari. I costi legati all'energia nucleare sono diversi tra di loro e investono diversi campi della politica e dell'economia di un paese:

- i costi in termini di tempi politici e burocratici per l'avvio di un programma nucleare nazionale;
- i costi in termini di tempo necessario per la scelta del fornitore tecnologico e per l'individuazione di investitori affidabili;
- i costi in termini di tempo necessario a individuare nel territorio luoghi adatti alla realizzazione di impianti nucleari con relative ed eventuali compensazioni economiche nei confronti degli enti e delle comunità locali;
- i costi economici per la realizzazione degli impianti e per la rete di radioprotezione;
- i costi relativi all'import di combustibile nucleare;
- i costi relativi allo smaltimento dei rifiuti nucleari;

- i costi di smantellamento di centrali nucleari obsolete o non più agibili.

La semplice volontà di puntare sul nucleare per il futuro non è chiaramente abbastanza per portare effettivamente con successo a termine questo progetto. Il primo ostacolo che si presenta dinanzi a un governo che vuole implementare la produzione di energia nucleare in Italia è la necessità di renderla effettivamente legale. I due referendum tenutisi nel 1987 e, soprattutto, il quesito III di quello del 2011 hanno, di fatto, reso impossibile per ogni azienda, pubblica e privata, di investire in progetti nucleari sul territorio nazionale. Un nuovo eventuale tentativo di reintrodurre il nucleare in Italia dovrà sicuramente implementare una nuova normazione prima di avviare il progetto. Tutto questo, come già accaduto nel 2011, potrebbe portare, verosimilmente, a indire un nuovo referendum abrogativo contro le nuove norme in materia, dilungando i tempi per l'effettivo avvio di un programma nucleare. Oltre a portare con sé una proposta referendaria, l'eventuale nuova normazione in materia di nucleare porterebbe, molto probabilmente, a una mobilitazione di chi ideologicamente sarebbe contrario. Sebbene questi non siano costi quantificabili, vanno comunque considerati da qualsiasi governo voglia intraprendere questa via. Si stima che, nel migliore dei casi, per superare l'ostacolo normativo e burocratico iniziale, debbano passare alcuni anni, se non diversi (Bevilacqua, 2011).

Supponendo quindi che la prima fase burocratica sia stata superata e che un eventuale referendum abrogativo non abbia minato la normazione in merito alla produzione nucleare sul territorio nazionale, il nuovo ostacolo sarebbero i tempi per la realizzazione di uno studio di fattibilità e l'individuazione del fornitore tecnologico dal quale acquistare uno o più reattori. Come visto in precedenza, al mondo ci sono diversi leader nel campo, però, oltre a considerarne la posizione nel campo dell'innovazione tecnologica nucleare, bisogna considerarne la loro posizione geopolitica, soprattutto a seguito dello scoppio della guerra in Ucraina. Accordi con fornitori russi, oltre che difficilmente realizzabili per via delle sanzioni imposte dai paesi occidentali al paese guidato da Vladimir Putin, risulterebbero anche fortemente criticati e osteggiati dai partner dell'Italia nell'Unione Europea e nella NATO. Meno difficoltoso, ma ugualmente poco condivisibile dai partner italiani, sarebbe l'acquisto e la stipulazione di contratti con fornitori ci-

nesi per via della posizione geopolitica del paese asiatico. Come alternative valide rimarrebbero Francia, Stati Uniti e Corea del Sud. Quando l'Italia riaprì al nucleare, nel 2008, il governo Berlusconi strinse accordi direttamente con l'allora presidente della Repubblica francese, Nicolas Sarkozy, per l'aiuto francese nella messa in modo del programma nucleare nazionale. Oltre all'avvio di studi di fattibilità, gli accordi prevedevano un ingresso su larga scala di investitori francesi nel mercato nucleare italiano per sopperire alla diffidenza degli investitori italiani (Iezzi, 2009). Potrebbe quindi avvenire qualcosa di simile per un eventuale programma nucleare italiano futuro: un accordo tra il governo italiano e quello francese sul nucleare risulterebbe molto più agevole per via della vicinanza storica, politica e geografica dei due paesi.

Un grande ostacolo che si dovrebbe affrontare per il successo del programma nucleare nazionale sarebbe quello dell'individuazione delle aree idonee a ospitare sul territorio un impianto nucleare con eventuale conseguente compensazione in finanziamenti monetari o infrastrutturali per gli enti locali e per la popolazione locale. Per far sì che ciò avvenga con le minori contestazioni politiche e ideologiche è necessario che si investa sull'informazione sul nucleare. Il dibattito sull'energia nucleare, in Italia soprattutto, è più ideologico che scientifico ed è fortemente radicata in buona parte della popolazione una paura intrinseca e spesso poco motivata del nucleare. Questa paura è sicuramente dovuta al disastro di Černobyl' del 1986 e alle conseguenze che ha portato anche qui in Italia, ma è dovuta anche a una mancata educazione e informazione sull'energia nucleare durante lo scorso secolo e gli ultimi anni. La mancanza di informazione su tematiche scientifiche particolarmente complesse, come lo è il tema del nucleare, porta alla diffidenza e al timore. Se ci fosse quindi una maggiore informazione sul tema, l'opinione pubblica non sarebbe quasi del tutto contraria all'energia nucleare in Italia come ha dimostrato nei due referendum del 1987 e del 2011; questa è l'idea di molti sostenitori dell'energia nucleare in Italia (Campana, 2022). Per quanto riguarda invece le compensazioni, lo Stato dovrebbe fornire, alle province e ai comuni ospitanti le centrali, somme di denaro come indennizzo. Una cosa simile avviene per tutti i comuni e le province che oggi ospitano parte dei rifiuti nucleari da smaltire. Infatti, nel dicembre 2021, il Comitato interministeriale per la programmazione economica ha stanziato quasi 14 milioni di

euro da ripartire tra i vari enti locali come compensazione per la presenza di rifiuti nucleari nei territori per l'anno 2020. La ripartizione viene eseguita in base alla quantità e alla radioattività dei vari rifiuti (Ambiente & Sicurezza, 2022).

L'individuazione di un territorio idoneo a ospitare una centrale nucleare non è opera così semplice come sembra. Non tutti i territori italiani, per via della loro conformazione o della loro posizione, potrebbero essere idonei a ospitare una centrale nucleare. I fattori da considerare sono: la prossimità a fonti d'acqua da utilizzare per il raffreddamento del reattore; bassa densità della popolazione; livello di rischio sismico basso o assente. Prima del referendum sul nucleare del 2011, si discusse molto su quali potessero essere le zone più adatte alla realizzazione di diverse centrali nucleari. Secondo una indiscrezione dei Verdi, nel 2010, furono individuati da ENEL e EDF dei siti idonei. Questi erano: Monfalcone (Friuli Venezia Giulia), Chioggia (Venezia), Caorso (Emilia Romagna), Fossano e Trino (Piemonte), Scarlino (Toscana), San Benedetto del Tronto (Marche), Montalto di Castro e Latina (Lazio), Termoli (Molise), Mola di Bari (Puglia) o un sito tra Nardò e Manduria, Scanzano Ionico (Basilicata), Oristano (Sardegna), Palma (Sicilia), (Reuters, 2010).

I costi per la realizzazione di un'intera centrale nucleare, a partire dagli anni '80, sono aumentati e di molto. Se negli anni '60 dello scorso secolo, infatti, una centrale nucleare costava circa 1.000\$ per KWe, oggi un nuovo impianto può costare, per ogni KWe, circa 12.000\$. Questo incremento è dovuto innanzitutto all'aumento dei costi indiretti, ovvero quelli dovuti a spese amministrative, di consulenza e di tutta una lunga serie di spese non legate direttamente ai materiali e ai reattori necessari alla centrale, e in buona parte anche all'aumento dei costi del lavoro specializzato. Per realizzare una centrale nucleare servono infatti diverse migliaia di lavoratori, molti dei quali devono avere competenze nel campo e devono rispettare prerequisiti imposti da regolamenti internazionali e nazionali. Testimonianza di questo aumento esponenziale dei costi di realizzazione è la centrale, ancora in fase di costruzione, di Sizewell C, nel Suffolk, in

Gran Bretagna. Secondo le stime questo impianto costerà infatti 24 miliardi di dollari, tra le proteste degli oppositori al nucleare e degli esperti (Centini, 2022).¹⁶

L'aumento dei costi per la costruzione di una centrale nucleare è dovuto anche a come vengono reperiti i fondi per la sua realizzazione. Molte aziende che hanno il compito di realizzare le centrali non hanno a disposizione i capitali necessari per far fronte alla costruzione di una centrale, soprattutto se si considerano i costi relativi ai ritardi e alle spese inattese, come il caso della centrale nel Suffolk in Gran Bretagna. Quando lo Stato non si fa carico direttamente dei costi, le aziende devono rivolgersi direttamente alle banche, che prestano il denaro solo con una forte garanzia di acquisto, da parte dello Stato, dell'energia prodotta dalla centrale una volta ultimata e imponendo tassi di interesse molto elevati. I tassi di interesse sui prestiti per la realizzazione delle centrali nucleari sono elevati per via del rischio che le banche sentono di correre; questo non è dovuto a una carente sicurezza del nucleare, bensì dovuta ad una apparente precarietà di coerenza politica che ha contraddistinto soprattutto le scelte politiche europee sul nucleare. Si stima che i ritardi e i tassi di interesse influenzino del 30% il costo finale di un impianto nucleare.¹⁷

Il tema della rete di radioprotezione è un altro importante punto di un eventuale programma nucleare. Per rete di radioprotezione si intende tutto il meccanismo messo in atto per la protezione di tutta la popolazione dalle radiazioni prodotte dall'azione dell'uomo, non solo quindi dalla produzione di energia nucleare. L'Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione si occupa, in Italia, di istruttoria, valutazione tecnica e scientifica, monitoraggio e prevenzione in materia di radioprotezione; si occupa anche di lavorare sulle centrali e i siti nucleari facenti parte del programma nucleare italiano pregresso.¹⁸ I costi del suo lavoro, nel 2021, ammontano a 15.621.732,37 €.¹⁹

¹⁶ Articolo relativo alle proteste degli esperti per la realizzazione del complesso nucleare Sizewell C. Di Greenreport, 2022.

¹⁷ Dati reperiti su World Nuclear Association, 2021.

¹⁸ Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, 2022.

¹⁹ Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, rendiconto finanziario gestionale spese, 2022.

Un altro fattore sicuramente importante quando si parla della realizzazione materiale di una centrale nucleare sono i tempi. Dal momento in cui iniziano i lavori di realizzazione a quando inizia la produzione energetica servono diversi anni, già tra gli anni '50 e gli anni '60 dello scorso secolo i tempi di realizzazione e messa in funzione erano nell'ordine di cinque o sei anni; ad esempio, la prima centrale italiana, quella di Latina, venne realizzata tra il 1958 e il 1962 e entrò in funzione solo nel 1963. Ulteriore esempio è anche la centrale di Trino, in provincia di Vercelli, che venne realizzata tra il 1961 e il 1964 ed entrò in funzione nel 1965. Oggi i tempi di realizzazione risultano molto spesso più lunghi di quelli dello scorso secolo, e fanno molto clamore alcune centrali che, per essere portate a termine, hanno dovuto subire numerosissimi ritardi e lievitazioni considerevoli di costi. Questo è il caso, ad esempio, dell'unità 3 della centrale nucleare di Olkiluoto, in Finlandia, che, per via di numerosi problemi tecnici e di realizzazione, ha visto la sua messa in funzione posticipata di ben 13 anni dall'inizio dei lavori. Infatti, se il progetto prevedeva l'inizio dei lavori nel 2005 e la fine di questi nel 2009, la realtà non è stata per nulla clemente con le intenzioni; la centrale è infatti entrata in funzione, con estrema difficoltà, all'inizio del 2022 (Reuters, 2014), (Paccariè, 2021).

Sorte simile è quella dell'unità 3 della centrale nucleare francese di Flamanville, la quale è in fase di costruzione dal 2007 e il suo prezzo finale, che sembra arriverà a circa 12,7 miliardi di euro, sarà quattro volte quello preventivato prima dell'inizio dei lavori (QualEnergia, 2022).

L'approvvigionamento di combustibile nucleare non sarebbe uno dei problemi da sottovalutare. Infatti l'Italia non ha, nel suo territorio, abbastanza uranio da garantire nel tempo un'indipendenza da altri paesi. Si stima infatti che, nei giacimenti italiani, ci siano 4.800 tonnellate di uranio, che basterebbero solo per pochi anni di produttività. I maggiori esportatori di uranio al mondo ai quali si dovrebbe rivolgere il nostro paese sono Australia, Canada e Kazakistan.²⁰ Il prezzo dell'uranio è poi destinato ad aumentare poiché la sua richiesta, per via della necessità crescente di decarbonizzare la produzione energetica, sta aumentando. Se infatti nel gennaio 2021 una libra di uranio costava

²⁰ Dati relativi all'estrazione di uranio nel mondo, dati di WISE uranium project, 2022.

25\$ circa, oggi ne costa circa 49.²¹ Per il suo funzionamento, un impianto da 1 GW di potenza ha bisogno di circa 160-200 tonnellate annue di uranio (Armaroli, Balzani, 2017). L'uranio però non può essere utilizzato grezzo in un reattore nucleare, questo deve essere arricchito per divenire fissile. Una tipica barra di uranio ancora non utilizzata e da inserire in un reattore contiene, come già detto, un 95% circa di materiale non fissile e un 5% circa di materiale fissile. Queste percentuali vengono raggiunte con l'arricchimento, processo che fa aumentare la quantità di isotopi, di uranio in questo caso, potenzialmente fissili. Il costo del combustibile nucleare incide per il 17% nel costo dell'energia finale secondo dati della francese Areva (ENEA, 2011).

3.5 I diversi tipi di reattori nucleari a fissione

I reattori nucleari a fissione utilizzati dagli anni '50 dello scorso secolo fino a oggi differiscono tra loro. La differenza sostanziale va ravvisata nel tipo di refrigerante utilizzato all'interno dei reattori nucleari. Acqua, gas, metalli liquidi o sali liquidi sono i refrigeranti a oggi utilizzati all'interno dei reattori (ARIS, 2016).

1. Reattori raffreddati ad acqua: all'interno di questa categoria fanno parte tutti quei reattori che utilizzano l'acqua come refrigerante e moderatore; quest'acqua può essere "leggera" o "pesante" a seconda della presenza di una quantità significativa dell'isotopo dell'idrogeno deuterio che la rende più "pesante". La presenza di questo isotopo non aumenta la naturale radioattività dell'acqua ma la rende più densa dell'11% e quindi maggiormente capace di rallentare i neutroni (Focus, 2002). A questa categoria appartengono i reattori PWR, ad acqua leggera pressurizzata, i più utilizzati e attualmente in funzione, e i reattori BWR, ad acqua leggera bollente. La differenza tra i due si ravvisa nello stato fisico dell'acqua: durante la fissione nel reattore, nei reattori PWR l'acqua rimane pressurizzata e allo stato liquido per essere poi vaporizzata in un apposito vaporizzatore che ne abbassa la pressione, nei reattori BWR, invece, l'ebollizione generata dal calore della fissione vaporizza l'acqua che viene direttamente utilizzata per attivare le turbine e di conseguenza gli alternatori

²¹ Trading economics, 2022.

(Quintieri, 2010). Un altro reattore che utilizza acqua leggera è il russo RBMK, fiore all'occhiello dell'ingegneria sovietica; stesso modello del reattore 4 di Černobyl'. Il funzionamento del reattore RBMK è basato sull'acqua come refrigerante e la grafite come moderatore di neutroni che consentono l'utilizzo di uranio arricchito all'1,8% circa. La Russia è ancora oggi dotata di reattori RBMK aggiornati a seguito del disastro di Černobyl'.²²

2. L'utilizzo dell'acqua pesante come moderatore e come refrigerante nei reattori, per via delle sue caratteristiche, permette l'utilizzo di uranio naturale o scarsamente arricchito, nello specifico tra l'1 e l'1,5%. A questa famiglia appartiene il reattore CANDU, sviluppato e utilizzato soprattutto in Canada. Questo particolare tipo di reattore utilizza uranio naturale, arricchito allo 0,7%, e ha un funzionamento simile al reattore ad acqua leggera PWR: l'acqua pesante, scaldata dalla reazione di fissione e tenuta ad alta pressione per non vaporizzarla, viene utilizzata per vaporizzare acqua leggera che attiva le turbine e di conseguenza l'alternatore. Come combustibile, all'interno dei reattori CANDU, possono essere utilizzate porzioni di combustibile scarsamente arricchite e già utilizzate da altri reattori. Secondo molti sostenitori dei reattori ad acqua pesante, questi risultano essere importanti per perseguire il progetto di non proliferazione delle armi nucleari per via dell'utilizzo di uranio non arricchito (Whitlock, 2010). Questa tesi però cozza con una caratteristica di questo tipo di reattori: uno dei prodotti di scarto della fissione nei reattori ad acqua pesante è infatti il plutonio, utilizzato da molte nazioni nelle bombe atomiche. Tramite il riprocessamento del combustibile esausto di un suo reattore ad acqua pesante, fornitogli dal Canada, e all'estrazione del plutonio, l'India è riuscita a sviluppare il suo arsenale nucleare.²³
3. Un tipo di refrigerante, sicuramente meno diffuso dell'acqua, è il gas, nello specifico anidride carbonica o elio. Questi reattori sono dotati anche di grafite come moderatore di neutroni che consente l'utilizzo di uranio naturale o scarsamente arricchito

²² Informazioni reperite da Wikipedia, Reattore nucleare RBMK.

²³ Approfondimento relativo allo sviluppo dell'arsenale atomico indiano, Atomic Heritage Foundation, 2018.

come combustibile. I primi esemplari di reattori refrigerati a gas furono i MAGNOX britannici e gli UNGC francesi, la loro costruzione però non fu molto diffusa. Il loro scarso utilizzo è dovuto al fatto che questi reattori non hanno una grande potenza, circa 500 Mw netti, e costi di realizzazione che nel tempo si sono rivelati meno economici dei reattori ad acqua. Una successiva evoluzione dei reattori a gas è quella degli AGR sviluppati in Gran Bretagna; questi hanno una capacità di produzione superiore, all'incirca di 1.200 Mw. Il vantaggio di questi reattori su quelli ad acqua, per via delle sue caratteristiche, è che non hanno necessità di fermati per ricaricare il combustibile. Sulla base di questo tipo di tecnologia si stanno sviluppando gli studi per reattori futuri, denominati HTGR, reattori refrigerati con gas ad alta temperatura, in questo caso elio che, essendo un gas inerte, non diviene radioattivo e non reagisce con altre sostanze. Questi reattori potranno lavorare a temperature molto elevate, circa 700-950°C, e garantire maggiore efficacia produttiva.²⁴

4. I reattori nucleari refrigerati a metallo fuso sono oggi utilizzati quasi esclusivamente nei sottomarini nucleari. Le peculiarità del metallo fuso come refrigerante rendono anche questo tipo di reattore una buona base di studio per le future centrali nucleari. I metalli utilizzati come refrigerante nei reattori nucleari sono stati, dall'inizio della sperimentazione a oggi: il mercurio, caduto in disuso per via della sua instabilità e della sua tossicità; il sodio che, nonostante potesse andare bene per via della sua bassa corrosività nei confronti degli altri metalli presenti del reattore, si è dimostrato parecchio instabile, soprattutto a contatto con l'acqua e aria, e tendente a una forte radioattività durante l'attività del reattore;²⁵ il piombo che, a differenza degli altri metalli e dell'acqua e del gas, ha delle caratteristiche che lo renderebbero più sicuro se correttamente utilizzato. Il piombo infatti ha una grande capacità di assorbimento di alcune radiazioni e una sua eventuale fuoriuscita causerebbe una loro modesta dispersione, questo perché il piombo, a contatto con l'aria, solidificherebbe in fretta, mentre acqua e gas potrebbero diffondersi più rapidamente e in maniera incontrolla-

²⁴ Informazioni reperite da World Nuclear Association, 2018.

²⁵ Incidente alla centrale giapponese di Monju con dispersione di sodio nell'ambiente, World Nuclear News, 2010.

ta. I reattori refrigerati a metallo, per via delle loro caratteristiche, riescono a operare un riprocessamento del combustibile molto efficiente. Si stima che i reattori nucleari refrigerati a metallo liquido avranno una efficacia del riprocessamento quasi del 99,9%, un dato che, se raggiunto effettivamente, ridurrebbe drasticamente l'impiego di combustibile e la produzione di rifiuti nucleari altamente radioattivi (Ciotti, Manzano, Ruberti, 2017).

5. L'utilizzo dei sali fusi come refrigerante per i reattori è in fase di studio e sperimentazione sostanzialmente dagli anni '40 dello scorso secolo. A partire da quegli anni, nel mondo cominciarono a sorgere diversi piccoli reattori sperimentali refrigerati a sali fusi; questi progetti però non ottennero gli stessi finanziamenti e lo stesso sviluppo che ebbero altri tipi di reattori, questo per via di diffidenza politica e societaria nei confronti di questa tecnologia (MacPherson, 1985). Oggi, a differenza del passato, si guarda ai reattori refrigerati a sali fusi come a una possibilità per i reattori futuri. In Cina, infatti, è in fase di sperimentazione un reattore di questa tipologia che, in caso di successo, potrebbe costituire la base di molti programmi nucleari nel mondo. Il reattore sperimentale utilizza il fluoro fuso a 450°C e ad esso viene aggiunto il Torio, un particolare elemento, meno radioattivo e più disponibile in natura dell'uranio. La presenza del combustibile nel sale liquido di raffreddamento consentirebbe di operare a temperature più alte rispetto a quelle consentite ad esempio dall'acqua e, oltre a essere un vantaggio per via delle caratteristiche fisiche dei sali, consentirebbe di usare il calore come altra fonte energetica. Un altro vantaggio che avrebbe questo tipo di reattori è la sua capacità di utilizzare, come combustibile, rifiuti delle centrali nucleari convenzionali ad acqua. Il principale ostacolo a questa tecnologia rimangono i costi di manutenzione dell'apparato chimico del reattore (Lanzavecchia, 2021), (AIN, 2020).

Con il termine “*generazione*”, associato ai diversi tipi di reattori nucleari, si fa riferimento a una distinzione teorica e scientifica più che temporale. Oggi vengono distinte quattro diverse generazioni di reattori nucleari; fino ad ora e come si vedrà meglio in seguito, però, la nascita di una generazione successiva di generatori non ha interferito con il funzionamento e la produttività dei reattori di quelle precedenti:

1. La prima generazione affonda le sue radici alla fine degli anni '30 del Novecento, periodo in cui, a seguito della scoperta della fissione dell'atomo da parte del chimico tedesco Otto Hahn (Gandolfi, 2021), molti scienziati iniziarono a lavorare su questa scoperta portando, nel 1942, all'attivazione del primo reattore nucleare della storia presso l'Università di Chicago, a opera, tra gli altri, dello scienziato italiano Enrico Fermi e, nel 1945, all'utilizzo della prima bomba nucleare per scopi bellici. Il primo reattore aveva una potenza di mezzo Watt, ma fece da apripista per tutti i reattori che, a partire dagli anni '50 cominciarono a essere realizzati. Uno degli ultimi reattori di prima generazione a essere spento è stato il reattore britannico di Wylfa nel 2012, appartenente alla famiglia di reattori MAGNOX (Romano, 2021).
2. La seconda generazione è contraddistinta da una maggiore capacità di produzione elettrica, molte arrivano a una capacità di 600-1.000 Mwe, e hanno cominciato a essere realizzate a partire dagli anni '70 fino alla prima metà degli anni '80 del secolo scorso. Questo periodo è considerato come il più florido per il nucleare, infatti, in quegli anni, vennero realizzati numerosi reattori in tutto il mondo anche per affrancarsi un po' dalla dipendenza dal petrolio. Questa generazione vide la sempre più crescente affermazione dei reattori refrigerati ad acqua. Alla seconda generazione appartiene il quarto reattore RBMK, di produzione sovietica, della centrale di Černobyl'. Il tema della sicurezza, a seguito del disastro di Černobyl', è divenuto così preponderante da spingere per una generale messa in sicurezza dei reattori nucleari del mondo. A seguito delle modifiche molti reattori risalenti alla seconda generazione sono ancora attivi e la loro produttività viene progressivamente allungata nel tempo, alcuni arriveranno ad avere una vita di 80 anni prima del loro spegnimento (Romano, 2021).
3. La terza generazione è quella che privilegia la sicurezza su tutti gli altri aspetti. I paesi che, dopo il disastro di Černobyl', decisero di continuare a perseguire la via del nucleare decisero di investire nella sicurezza dei loro impianti. Se da una parte si procedette con la messa in sicurezza degli impianti esistenti, dall'altra si svilupparono nuovi reattori con nuovi sistemi di prevenzione e sicurezza. Questi sistemi, sempre più affinati nel tempo, vengono oggi distinti tra attivi e passivi: quelli attivi pre-

vedono un intervento diretto dell'uomo; quelli passivi, invece, sviluppati principalmente a partire dagli anni '80, vengono azionati direttamente da fenomeni fisici e chimici che si innescano automaticamente in determinate condizioni (ENEA, 2021). Uno di questi sistemi passivi viene azionato, ad esempio, attraverso la forza di gravità: nei reattori di terza generazione più moderni le barre di combustibile vengono tenute sospese attraverso un sistema meccanico alimentato a elettricità: in caso di blackout generale e, quindi, nel caso in cui non sia possibile interrompere la fissione attivamente, le barre cascano nel nocciolo interrompendo immediatamente la fissione. Oltre a questi sistemi di sicurezza passivi, con questa generazione di reattori sono state introdotte le strutture di contenimento in cemento armato attorno al reattore. Queste, come visto, oltre a fornire una schermatura radioattiva, forniscono una protezione al reattore da eventuali attacchi esterni. Le strutture di contenimento sono realizzate per resistere, tra le altre cose, a impatti di aeroplani e forti scosse di terremoto (Romano, 2021).

4. La quarta generazione di reattori nucleari non è attualmente in commercio e, secondo stime recenti, i primi reattori verranno realizzati non prima del 2030. Questi sfrutteranno, come già visto, diversi tipi di tecnologie. Si stanno infatti sperimentando reattori refrigerati con sali, gas e metalli fusi.²⁶ Gli studi su questa generazione hanno l'obiettivo di superare molti dei problemi legati all'energia nucleare delle scorse generazioni: la riduzione significativa dei rifiuti nucleari altamente radioattivi attraverso il riprocessamento e il riutilizzo del combustibile; la riduzione dei rischi legati all'elevata pressurizzazione dell'acqua; l'utilizzo di un combustibile meno radioattivo, come il torio; l'utilizzo efficiente del calore generato dalla fissione (Romano, 2021).

Gli Smart Modular Reactors (SMR) sono un tipo di reattore nucleare relativamente giovane sul cui sviluppo, per via delle loro caratteristiche, molti paesi stanno investendo. Questo particolare tipo di reattore, a differenza dei comuni reattori precedentemente analizzati, può avere dimensioni significativamente inferiori, è producibile in serie e

²⁶ U.S. Department of Energy, 2021.

installabile dove necessario, e ha una produzione che va dai 5 MWe ai circa 300 MWe. Le caratteristiche strutturali di uno Small Modular Reactor consentono di abbattere i costi di realizzazione, soprattutto in materia di sicurezza: innanzitutto perché questi reattori, essendo più piccoli e operando con meno combustibile, non possono raggiungere situazioni di criticità come altri reattori, soprattutto quelli raffreddati ad acqua; questo è dovuto anche alla presenza di sistemi di sicurezza passivi che permettono di arrestare la fissione ogni qualvolta si verificano condizioni potenzialmente pericolose. Questi reattori non avranno inoltre necessità di avere grandi impianti di refrigeramento, possono anche essere collocati in zone abitate per sfruttarne non solo l'energia prodotta ma anche il calore generato dalla fissione. Alcuni reattori in fase di sviluppo sono progettati per operare per 30 anni senza alcun tipo di rifornimento di combustibile, altri invece potranno raggiungere una operatività di 7 anni senza alcun ricambio di combustibile (IAEA, 2021). Di questi reattori ad oggi esistono solo alcuni prototipi, tutti ancora non installati a terra, ma installati su navi. Il primo reattore di questo tipo verrà installato a terra, in Russia, secondo i progetti, entro il 2028, e per la sua realizzazione dovrebbero servire circa 4 anni (AIN, 2021). Anche gli USA e il Canada stanno investendo risorse per la creazione di Small Modular Reactors: nel 2020 negli USA è stato approvato il primo progetto per la realizzazione di un tipo di SMR (Levita, 2020), e nello stesso anno il governo canadese ha avviato un programma di investimenti per la ricerca su questo tipo di reattori.²⁷

3.6 Quanti reattori servirebbero all'Italia?

Il tema dell'indipendenza energetica è diventato, come visto, di primaria importanza per tutta la politica italiana. L'Unione Europea e soprattutto i paesi che confidavano maggiormente nell'importazione di gas naturale proveniente dalla Russia per soddisfare parte del proprio fabbisogno energetico si sono ritrovati, a seguito dell'invasione dell'Ucraina perpetrata dalla Russia, a dover fronteggiare i costi delle sanzioni imposte al paese guidato da Vladimir Putin. Come già visto, alcuni esponenti politici hanno trovato

²⁷ Informazioni reperite dal sito del Government of Canada, 2021.

nel nucleare una risposta a questa necessità di affrancamento. Le domande che sorgono quindi sono:

1. Di quanti reattori nucleari ipoteticamente avrebbe bisogno l'Italia per sopperire al suo intero fabbisogno energetico?
2. Quanti reattori servirebbero invece per sostituire il gas naturale? E quanti per sostituire quello proveniente esclusivamente dalla Russia?

Secondo il bilancio energetico del 2018 redatto dal Ministero dello Sviluppo Economico, il consumo energetico italiano è di 321,4 TWh, di cui l'86,3% è energia prodotta in Italia, mentre il resto è importata dall'estero (Terna, 2018), (Green Planner, 2018). Ipoteticamente, se si volesse sostituire qualsiasi altra fonte energetica con il nucleare servirebbe un numero di reattori considerevoli. Tutto dipenderebbe dal tipo di reattori che si adopererebbero. Un reattore, non tra i più recenti, ha una potenza di circa 1.000 MW e in un anno è capace di generare circa 8 TWh. Dividendo il valore del consumo energetico totale italiano riportato nel bilancio del 2018 che equivale a 321,4 TWh per gli 8 TWh potenzialmente prodotti da un singolo reattore nucleare con potenza annua di 1.000 MW otteniamo 40,175: altro non è che il numero di reattori da 1.000 MW necessari per coprire l'intero fabbisogno italiano. Una centrale nucleare in media ha dai 2 ai 7 reattori nucleari di varie dimensioni,²⁸ dunque ipotizzando la costruzione di 40 reattori simultaneamente, si arriverebbe alla conclusione che servirebbero dalle 6 alle 20 centrali per ospitare circa 40 reattori da 1.000 MW. Se si prendono in considerazione invece reattori nucleari più recenti, come gli ultimi ad acqua pressurizzata di produzione francese con una potenza di circa 1.600 MW, il numero di reattori necessari scenderebbe. Ognuno di questi reattori ha una capacità di 12,8 TWh annui e ne servirebbero circa 25 per garantire 321,4 TWh all'anno. Come visto in precedenza, però, questi reattori hanno tempi di realizzazione molto lunghi e per questa ragione anche i costi economici di realizzazione sono piuttosto elevati (Reuters, 2014), (Paccariè, 2021).

La combustione del gas naturale, nel 2021, ha fornito all'Italia circa il 40% dell'energia prodotta. Infatti, dei circa 75 miliardi di m³ di gas importati in Italia nel 2021,

²⁸ Informazioni reperite da, Wikipedia, Lista di centrali nucleari.

solo 29,07 miliardi di m³, circa il 40% del totale, provengono dalla Russia. Va inoltre specificato che quasi la metà del gas naturale importato o estratto in Italia viene utilizzato per produrre energia elettrica, l'altra parte viene utilizzata per gli impianti di riscaldamento degli edifici, per il settore produttivo industriale o come carburante per veicoli. Nel 2021, dei circa 75 miliardi di m³, solo 35 miliardi di m³ sono stati utilizzati per generare 140 TWh di energia elettrica. Servirebbero circa 18 reattori da 1.000 MW o 11 reattori più recenti da 1.600 MW. Se l'Italia invece volesse affrancarsi da tutto il gas naturale, importato o estratto nel nostro territorio, con la sola energia nucleare, dovrebbe preventivare di realizzare abbastanza reattori da produrre 300 TWh di energia elettrica,²⁹ e nel frattempo dovrebbe investire per elettrificare i sistemi di riscaldamento degli edifici, i sistemi produttivi industriali che ad oggi utilizzano il gas naturale e i veicoli alimentati a metano. Per sostituire dunque 300 TWh di energia prodotta da gas naturale con energia prodotta dal nucleare servirebbero 38 reattori da 1.000 MW o 24 reattori da 1.600 MW.³⁰

Se si cercasse di usare l'energia nucleare esclusivamente per sostituire il gas naturale proveniente dalla Russia, che corrisponde a 29,07 m³ all'anno ed è capace di generare 116 TWh di energia elettrica all'anno, l'Italia dovrebbe dotarsi di 15 reattori da 1.000 MW o di 9 reattori da 1.600 MW (Galliano, 2022), (Romano, 2022).

Sebbene, come visto, molte delle forze politiche italiane siano effettivamente favorevoli al nucleare, nessuna di queste, però, nei programmi elettorali del 2022, ha riferito quale sia realmente l'obiettivo del loro progetto nucleare, quali fonti vorrebbero sostituite con nuovi reattori nucleari e ipoteticamente quanti reattori nucleari vorrebbero realizzare.

3.7 Prospettive future: la fusione nucleare

La fusione nucleare utilizzata per la produzione di energia elettrica è oggi ancora in una fase iniziale di studio. Il processo di fusione nucleare è quello che oggi sostanzial-

²⁹ TWh di energia elettrica generati da 75 miliardi di m³ di gas naturale.

³⁰ Per calcolare quanta energia viene prodotta in un anno da un reattore nucleare basta moltiplicare la potenza elettrica di un reattore per le sue ore medie annuali di attività, 8.000.

mente permette alla vita sul nostro pianeta di esistere. Questo è infatti il processo che avviene nella nostra stella, il Sole, che, per via delle altissime temperature presenti sulla sua superficie, unisce atomi di idrogeno per generare atomi di elio. La fusione nucleare nelle stelle non prevede solo la fusione di atomi di idrogeno per generare atomi di elio; esistono infatti stelle che, per via della loro massa e della loro composizione, riescono a fondere tra di loro atomi più “pesanti” dell’idrogeno,³¹ come elio, carbonio, neon, silicio e persino atomi più pesanti nel caso di esplosioni stellari dette supernove (Dresbach, 2018). Questi processi di fusione nucleare nelle stelle quindi, in situazioni incontrollate, generano quantità enormi di energia per via dell’elevata velocità con cui queste reazioni avvengono. In situazioni controllate, in cui la velocità di reazione viene rallentata dall’azione dell’uomo, queste potrebbero essere utilizzate per produrre energia elettrica.

Il progetto di utilizzare la fusione nucleare come fonte di energia elettrica è allo studio dalla seconda metà del XX secolo. Nel 1977, infatti, i paesi dell’EURATOM e la Commissione europea hanno approvato il progetto JET (Joint European Torus) che prevedeva la realizzazione di un reattore che sfruttasse la fusione di due isotopi dell’idrogeno, il deuterio e il trizio, per produrre energia. Dopo una serie di esperimenti durati anni, nel 1997 si ha il più importante, quello che darà le basi alla ricerca futura: nel settembre di quell’anno, infatti, con un input di 24 MW per riscaldare il composto di deuterio-trizio e renderlo plasma, il reattore JET è riuscito a generare 16 MW di energia. Questo incredibile risultato, sebbene non fosse economicamente apprezzabile in quanto il fattore di guadagno energetico fu negativo, è ancora oggi alla base degli studi in corso per la commercializzazione della fusione nucleare.³²

Il progetto sull’energia da fusione nucleare su cui la comunità scientifica pone molte delle sue speranze è ITER. Questa sigla sta per International Thermonuclear Experimental Reactor, ma deve essere intesa anche con il senso originale latino: “*iter*” in latino infatti significa “*cammino*”, “*percorso*”. Il progetto è supportato da i paesi dell’EURATOM, Cina, India, USA, Giappone, Corea del Sud, che nel 2006 hanno iniziato questa cooperazione. I lavori di realizzazione del reattore iniziati nel 2007 a Cadarache, in

³¹ Inteso come “peso atomico”.

³² Storia del progetto JET, dal sito EUROfusion.

Francia, dovranno terminare, secondo l'Organizzazione ITER, nel 2025. Da quel momento inizieranno i primi test sul reattore che dovrebbero durare svariati anni.

La difficoltà principale da superare nella fusione nucleare è quella di costruire un reattore capace di gestire le temperature elevatissime, circa 100 milioni di gradi °C, che il plasma composto da deuterio-trizio deve raggiungere per reagire. Nessun materiale presente sulla terra infatti sarebbe capace di resistere a simili temperature. La soluzione trovata dagli scienziati è quella di costruire un reattore capace, attraverso dei magneti molto potenti, di non far entrare in contatto il plasma con le pareti di contenimento. Per via della complessità della struttura e del sistema di magneti, si stima che il reattore peserà circa 23 mila tonnellate. Il costo dell'intero progetto, nel 2010, era stimato a 7,3 miliardi di euro, cifra che, per via dei ritardi e per varie criticità, era già destinata ad aumentare: nel 2016 infatti la stima raggiunse i 13 miliardi di euro.

Un altro grande ostacolo che si è presentato agli scienziati è quella della scarsità dell'isotopo dell'idrogeno trizio in natura. Se il deuterio infatti è abbastanza comune in natura ed è facilmente ricavabile dall'acqua, il trizio è decisamente più raro e la sua produzione naturale non basta per soddisfare il fabbisogno produttivo energetico. Gli scienziati sono a lavoro per la creazione di un sistema auto produttivo dei reattori che, sostanzialmente, consenta durante la reazione di fusione di generare nuovo trizio (Ingegneria Italia, 2022).

La fase successiva al progetto sperimentale ITER è denominata oggi come progetto DEMO (Commissione Europea, 2022) e prevede la realizzazione e la messa in funzione di un reattore a fusione dimostrativo, ultimo passo per la realizzazione di reattori commerciali. L'intero progetto della fusione nucleare, in tutte le sue fasi, sembra fissare come data il 2060 per l'entrata in commercio dei primi reattori nucleari a fusione. Un appuntamento che, per come stanno evolvendo i lavori sul progetto ITER, sembra comunque destinato a slittare di qualche anno (Geopop, 2021).

La fusione nucleare utilizzata per produrre energia elettrica però rimane oggi un importante traguardo da raggiungere per numerosi motivi: innanzitutto la fissione nucleare non produce rifiuti radioattivi ad alta radioattività e a lunga decadenza; non produce CO₂ e altri gas serra; è potenzialmente rinnovabile in quanto necessita di isotopi di idro-

geno di cui uno, il deuterio, è molto comune in natura, e l'altro, il trizio, più raro, potrà essere più facilmente prodotto in futuro (Dulon, 2011).³³

³³ Articolo di approfondimento di Mastri G., 2022.

CONCLUSIONI

Per essere compreso nel suo complesso, insieme alle ragioni di chi ne è sostenitore e di chi ne è detrattore, il tema del nucleare, come visto all'interno del presente contributo, deve essere inserito nel suo contesto, oltre che essere analizzato il più oggettivamente possibile. Il contesto odierno, contraddistinto dalla necessità di decarbonizzare per permetterci verosimilmente di poter sopravvivere come specie, ha spinto molti a valutare il nucleare come possibile fonte energetica. La spinta verso la decarbonizzazione, però, è una necessità che gli scienziati pongono all'attenzione dei politici e della scienza ormai da mezzo secolo. La scienza, attraverso le sue teorie e i suoi studi arrivò ad affrontare svariati decenni prima della politica il problema del surriscaldamento della Terra e della sua atmosfera. Pensare che già nel 1896 Svante Arrhenius individuò nell'anidride carbonica il motivo dell'innalzamento della temperatura terrestre e che, già negli anni '70 del Novecento, gli scienziati si mostravano estremamente preoccupati per la situazione climatica mondiale, suscita sicuramente dello stupore; ci si dovrebbe chiedere perché gli interessi economici hanno avuto la meglio sul benessere del nostro pianeta e, di conseguenza, sulla nostra salute. La lotta al cambiamento climatico passa sicuramente dal nostro sistema di produzione di energia elettrica, divenuto uno dei beni essenziali del sistema produttivo e della vita di quasi ogni abitante della Terra. L'utilizzo sempre più massiccio di energie rinnovabili sembra essere la via individuata dalla maggior parte delle economie mondiali, queste consentono uno sviluppo economico sostenibile dal punto di vista ambientale. Esempi lampanti di economie sostenibili sono le “*green communities*”, nate per rispondere all'esigenza di sfruttare le risorse del territorio al meglio e di produrre in maniera ecologica, lasciando una impronta quanto più leggera sull'ecosistema. L'energia nucleare risulta essere, dal punto di vista delle emissioni di anidride carbonica nell'atmosfera, decisamente pulita, e questa sua peculiarità la rende particolarmente interessante in ottica di produzione energetica sostenibile.

Questa sua caratteristica, oggi, come detto, risulta essere uno dei punti di forza delle tesi sostenitrici del nucleare, e l'affermazione “tutti i paesi stanno dismettendo il nuclea-

re”, udita numerose volte durante la campagna elettorale 2022 in numerosi dibattiti TV da detrattori dell'energia nucleare, è quasi del tutto inesatta. Come visto nel secondo capitolo, molti paesi nel mondo stanno attualmente implementando politiche sull'energia nucleare, e uno dei paesi più vicini geograficamente, storicamente e politicamente all'Italia, la Francia, è il leader indiscusso nel campo del nucleare nell'Unione Europea. Come visto nel paragrafo del secondo capitolo interamente dedicato alla storia e alla situazione attuale del nucleare in Francia, “Il caso della Francia”, il nostro vicino, oltre ad avere una produzione energetica da fissione nucleare pari a quasi il 70% del suo fabbisogno energetico totale, è leader nell'esportazione di tecnologia legata alla produzione d'energia atomica ed è legato a programmi nucleari civili di numerosi paesi europei ed extraeuropei. Casi come quello della Finlandia e della Polonia, seppur diversi, ci mostrano come il nucleare sia una via molto praticata per svincolarsi da dipendenze esterne che, per via della situazione geopolitica, stanno divenendo sempre più scomode e difficilmente accettabili da parte dell'opinione pubblica. L'esigenza di allontanarsi dalla pressione economica e politica della Russia ha giocato un ruolo fondamentale nell'inserimento del nucleare nella tassonomia verde dell'UE: poco condivisibile ma comprensibile risulta l'inserimento del gas naturale, una fonte di energia largamente usata e su cui molti paesi, tra cui Italia e Germania, hanno investito parecchio per il processo di decarbonizzazione del sistema produttivo. Altri paesi dell'Unione Europea, oltre l'Italia, hanno abbandonato da tempo o non hanno mai avuto progetti di energia nucleare, altri invece, come Germania e Spagna, hanno avviato il lungo processo di denuclearizzazione del sistema produttivo energetico: per la Germania la chiusura del programma atomico coincide con il periodo di maggiore attrito con la Russia; in Spagna invece questo processo sarà ultimato solo nel 2035. Tuttavia, il processo di nuclearizzazione dell'energia sembra essere in rapida espansione nel resto del mondo: paesi come Cina e Corea del Sud sono leader in Asia per la loro tecnologia e la Corea del Sud vuole consolidare la sua leadership anche nel resto del mondo; la Russia gioca ancora un ruolo importante sul piano tecnologico e d'innovazione e gli Stati Uniti cercando di instaurare la loro leadership anche in questo campo, nonostante siano leggermente indietro rispetto a Corea del Sud e Russia.

Ultimo aspetto importante nella descrizione di questo lungo processo di nuclearizzazione del mondo è il caso italiano. L'Italia è infatti passata da essere un paese all'avanguardia nel campo del nucleare durante gli anni '60 e '70 del secolo scorso, a uno dei pochi paesi al mondo in cui il nucleare come fonte di energia civile è illegale per legge. Quello che sembra, però, è che la politica italiana non si sia mai arresa all'evidenza referendaria più volte espressa dagli elettori italiani. Il nucleare rimane tutt'oggi per molti motivi affascinante, a maggior ragione in un periodo di forte crisi energetica in cui il tema della diversificazione delle fonti energetiche è divenuto preminente; per molti altri invece sembra un miraggio estremamente negativo, che rievoca incidenti e drammi appartenenti alla storia dell'energia nucleare.

L'ultimo capitolo di questo lavoro di tesi si è soffermato sugli aspetti più importanti del tema del nucleare, fornendo alcune riflessioni e alcuni dati necessari per rispondere alla domanda che è alla base di questa tesi. Il tema del “*capacity factor*” è forse quello più favorevole alle tesi pro nucleare: è infatti una realtà che la scienza e la tecnologia, negli anni, abbiano fatto passi da gigante nel campo dell'energia nucleare, siamo infatti in grado di generare, in proporzione, più energia da un atomo di uranio che da qualsiasi altra fonte energetica. Ma se il “*capacity factor*” è una nota positiva nelle tesi a favore del nucleare, i rifiuti nucleari, come visto, hanno alcuni lati negativi con cui bisogna fare i conti. Alcuni di questi rifiuti, per via della loro radioattività e del lungo decadimento che necessitano, devono essere riposti in strutture sorvegliate e monitorate che, oltre ad avere costi considerevoli, possono presentare anche criticità non irrilevanti in caso di dispersione nell'ambiente.¹

Un aiuto a questo problema, a onor del vero, è stata la nascita e la diffusione di reattori che, per le loro caratteristiche di funzionamento, riescono a riprocessare le scorie nucleari e quindi a riciclarle riducendole drasticamente, in termini quantitativi, alla fine di un ciclo di combustione nucleare.

La sicurezza nucleare è il tema che più ha spinto l'opinione pubblica italiana verso la scelta dell'abbandono del programma nazionale dello scorso secolo. Il disastro di Čer-

¹ Breve resoconto della contaminazione da radiazioni avvenuta nel sito di stoccaggio WIPP negli USA nel febbraio 2014. Department of Energy, 2015.

nobyl' è stato però, per i paesi che hanno deciso di perseguire il progetto nucleare, un modo per analizzare le criticità delle centrali nucleari dell'epoca per porvi rimedio. I sistemi di sicurezza della cosiddetta "terza generazione" di reattori nucleari, nati dopo il 1986, sono più sofisticati e cercano di prevenire qualsiasi tipo di incidente possibile in un reattore, dai fenomeni naturali estremi a una esplosione, da un blackout a un attentato terroristico. Ma questi sistemi di sicurezza si stanno rivelando poco efficaci per la situazione creatasi nel corso dell'invasione dell'Ucraina da parte della Russia: la centrale nucleare ucraina di Zaporizhzhia è divenuta, durante il conflitto, uno dei campi di battaglia su cui i due eserciti si confrontano a colpi di artiglieria e attacchi missilistici; ne consegue una costante preoccupazione delle autorità competenti, come la IAEA che, nonostante gli sforzi e gli appelli all'abbandono del conflitto in quell'area, non sembrano riuscire a sventare il pericolo di un incidente nucleare.

La questione dei costi temporali, politici ed economici, è decisamente l'ostacolo più grande che un qualsiasi governo italiano dovrà pagare nell'ipotesi in cui voglia intraprendere la tortuosa strada del ritorno del nucleare. In termini temporali, come è chiaro, non si avrebbero progetti di centrali nucleari per diversi anni; infatti, come visto, servirebbe prima un percorso legislativo non privo di insidie, di cui la più grande sarebbe un eventuale nuovo referendum costituzionale abrogativo che, visti i risultati di quelli passati, sembra essere destinato a un ulteriore fallimento per i sostenitori del nucleare. Quello che servirebbe in Italia, prima di intraprendere nuovamente la via del nucleare, è l'educazione e l'istruzione al nucleare. Sebbene i più giovani guardino al nucleare come a una possibilità per il nostro paese (Lepri, 2021), per rendere questa strada più agevolmente percorribile è necessario che venga spiegato alla popolazione come il nucleare sia più sicuro rispetto al passato, ed eventualmente vantaggioso. Ciò risulta necessario anche nell'ottica di un possibile utilizzo della fusione nucleare, in un futuro che sembra però ancora lontano. Non dar peso al consenso e alle paure della popolazione porterebbe a un inevitabile fallimento politico del nascente programma nucleare. Dal canto dei costi economici, questi risultano essere, negli ultimi anni, decisamente lievitati per via di rallentamenti burocratici e amministrativi più che per problemi tecnici o di funzionamento dei reattori. La realizzazione di un reattore nucleare come il terzo reattore della

centrale di Olkiluoto, in Finlandia, è l'esempio, non l'unico sia chiaro, di come installare reattori nucleari sia oggi molto costoso economicamente e temporalmente.

Durante la campagna elettorale dell'estate 2022 si è discusso molto di nucleare di "nuova generazione". Come visto però questo è lontano da essere una solida realtà, risulta essere invece ancora un progetto in fase di sviluppo. Va comunque ammesso che quello che mostrano i risultati di alcuni test svolti con reattori di "quarta generazione" sembrano promettenti e sembrano risolvere alcuni dei problemi legati alla fissione nucleare fino ad oggi utilizzata: uno su tutti, l'utilizzo del torio, meno radioattivo rispetto agli isotopi di uranio e plutonio utilizzati ad oggi per la fissione. Come la "quarta generazione", anche gli Smart Modular Reactors, su cui sono riposte molte speranze per una produzione nucleare più flessibile e sicura, sono ancora in fase di studio e richiedono ancora svariati anni per poterli vedere effettivamente in commercio. Nell'ultimo capitolo si è inoltre parlato di quanti reattori l'Italia avrebbe bisogno, ipoteticamente, per soddisfare il suo intero fabbisogno energetico e di quanti invece servirebbero per sostituire il gas naturale, in toto o esclusivamente quello proveniente dalla Russia. Sebbene si tratti di meri calcoli che non tengono in considerazione la differenziazione delle fonti energetiche, necessaria per una pianificazione efficiente, risulta chiaro come sia ipoteticamente necessario installare un numero non indifferente di reattori a fissione per sostituire con il nucleare, ad esempio, il gas naturale.

Ultimo aspetto su cui il terzo capitolo si è soffermato è quello della fusione nucleare. La fusione nucleare è forse la fonte di energia che può risolvere i problemi legati al nostro sistema produttivo. Sebbene la ricerca sia ancora in fase iniziale, risultano molto positive le tesi degli scienziati secondo cui sia possibile produrre una grande quantità di energia da atomi di idrogeno senza produrre scorie ad alta radioattività e a lunga decadenza e senza produrre CO₂.

È d'obbligo ora rispondere alla domanda di questa tesi e ad altre domande che naturalmente sorgono affrontando questo tema. Il nucleare è un tipo di energia *green*? La risposta a questa domanda è sì. Il nucleare è una fonte di energia pulita, almeno quanto lo sono l'energia solare e l'energia eolica. In termini di emissioni di CO₂, come visto, il nucleare è tra le fonti di energia più pulite. Il problema che viene sempre posto sul nu-

clearare relativo ai suoi rifiuti radioattivi è sì legittimo, ma è un problema che presentano anche le pale eoliche e i pannelli fotovoltaici, basti pensare alle sostanze inquinanti, come il piombo acido, ancora contenute nelle batterie di accumulo usate dai pannelli fotovoltaici. Anche la realizzazione di una centrale nucleare ha un impatto ambientale, servono innumerevoli risorse naturali e industriali oltre che risorse minerarie come combustibile, ma anche la realizzazione di un parco fotovoltaico o di un parco eolico ha il suo impatto; per realizzare la struttura di una pala eolica, ad esempio, vengono ancora usati materiali derivanti dal petrolio e per produrre alcuni componenti di pannelli fotovoltaici si ricorre ancora a materiali estratti da miniere. Affermare quindi che l'energia nucleare sia *green* non è del tutto inesatto se si considerano *green* anche l'energia solare e quella eolica.

La domanda che segue però dopo la riflessione sul tema del *green* è legata alla sostenibilità del nucleare. Il nucleare è quindi sostenibile? Per rispondere a questa domanda, che risulta essere più politica che scientifica, bisogna contestualizzare la realtà in cui si vuole calare questa domanda. Se si ponessero oggi questo quesito in Francia, ad esempio, la risposta sarebbe sicuramente positiva: per via dei numerosi investimenti fatti nello scorso secolo e in questo per la realizzazione e il progressivo potenziamento del programma nucleare del paese, e per via della incredibile dipendenza del paese dal nucleare, risulterebbe impensabile rinunciarvi e, anzi, risulta persino improbabile pensare di smettere di investire ancora in questo campo. Lo stesso ragionamento lo si può fare per tutti quei paesi fortemente legati al nucleare e che hanno investito su questo negli ultimi anni. Diverso è il contesto dei paesi che, come l'Italia, hanno deciso di abbandonare il nucleare o che, su questo, non hanno mai investito. Come si è visto nel paragrafo dedicato ai costi relativi al nucleare, i tempi per realizzare un reattore nucleare oggi risultano molto più dilatati rispetto al passato, e il caso Finlandese è emblematico di questo problema: se, infatti, in un paese che possiede già una normazione sulla produzione di energia nucleare ci sono voluti 17 anni per realizzare un reattore nucleare, in un paese come l'Italia, che risulta ancora sfornito di una normazione sul tema e di una adeguata informazione sul nucleare, i tempi sarebbero decisamente più lunghi. Va inoltre aggiunto che, come è chiaro, la realizzazione di un reattore non porterebbe sicuramente a un

grosso giovamento alla causa della lotta al cambiamento climatico, men che meno dal punto di vista dell'indipendenza energetica dato che bisognerebbe importare praticamente tutto per la realizzazione dei reattori e il funzionamento degli stessi, dalla tecnologia al combustibile. Risulta quindi impossibile poter affermare che l'Italia possa prendere d'esempio l'approccio francese: è impensabile infatti che l'Italia riesca a dotarsi di abbastanza reattori da sopperire a circa il 70% della sua domanda energetica entro il 2050, anno in cui è stato fissato, dalla Commissione Europea, attraverso il *Green Deal* del 2019, l'obiettivo della neutralità climatica e della completa decarbonizzazione. È più verosimile che l'Italia, nei prossimi anni, provi a dotarsi di qualche reattore nucleare per integrare nel mix energetico nazionale anche questa fonte, affrontando l'opposizione dell'opinione pubblica.

Qual è quindi la strada da intraprendere per i paesi che non hanno la possibilità o l'intenzione di dotarsi di un programma nucleare? La via da percorrere è quella delle rinnovabili, investendo sulle risorse e specialmente sulla ricerca, per migliorarne le capacità e le prestazioni e per avvicinare, quanto più possibile, la commercializzazione della fusione nucleare. Anche questa via presenterà degli ostacoli e delle forti opposizioni: bisognerà anteporre le necessità ambientali ai valori paesaggistici, nel caso dei parchi eolici e solari, e bisognerà educare la gente alla fusione nucleare, a quanto questa, a differenza di quanto si è fatto con la fissione, potrà avere più vantaggi che svantaggi.

BIBLIOGRAFIA

- Académie française, (2002). “La dissuasion nucléaire Française: Genèse et actualité”, *Académie française* [online] [Consultato il 17 settembre 2022]. https://www.academiefrancaise.fr/sites/academie-francaise.fr/files/messmer_nucleaire_a-smp_2002.pdf
- Agi, (2022). “La Russia costruirà due reattori nucleari in Ungheria”. *Agi.it* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.agi.it/estero/news/2022-08-27/ungheria-russia-costruzione-reattori-nucleari-17869203/>
- Ambiente & Sicurezza, (2022). “Rifiuti nucleari: i contributi compensativi per i siti”. *Ambiente & Sicurezza* [online]. [Consultato il 29 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.ambientesicurezzaweb.it/rifiuti-nucleari-i-contributi-compensativi-per-i-siti/>
- ANSA, (2021). “Ambiente & Energia. Dalle rinnovabili il 37% dei consumi energetici in Italia”. *Ansa.it* [online]. [Consultato il 9 luglio 2022] Disponibile da: https://www.ansa.it/canale_ambiente/notizie/energia/2021/05/25/-dalle-rinnovabili-il-37-deiconsumi-energetici-in-italia-_4425370b-e08e-4125-8e0e-7cadd898834.html
- Armaroli N. e Balzani V., (2017). “La caccia all'uranio e i costi di una centrale”. *Agi.it* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.agi.it/blog-italia/energia-esostenibilita/la-caccia-all-uranio-e-i-costi-di-una-centrale-3285516/post/2017-10-01/#:~:text=La%20produzione%20del%20combustibile%20nucleare,rimpiazzate%20ogni%2018%20-%202024%20mesi.>
- Associazione Italiana Nucleare, (2020). “La gestione dei rifiuti nucleari”, *Associazione italiana nucleare* [online]. [Consultato il 10 agosto 2022]. Disponibile da: <http://www.associazioneitaliananucleare.it/la-gestione-dei-rifiuti-nucleari/>
- Associazione Italiana Nucleare, (2021). “Nell’Artico russo il primo SMR terrestre” [online]. *Associazione Italiana Nucleare*. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <http://www.associazioneitaliananucleare.it/nellartico-russo-il-primi-smr-terrestre/>
- Associazione Italiana Nucleare, (2021). “Nucleare nel mondo: la Finlandia”, *Associazione italiana nucleare* [online]. [Consultato il 17 settembre 2022]. Disponibile da: <http://www.associazioneitaliananucleare.it/nucleare-nel-mondo-la-finlandia/>
- Associazione Italiana Nucleare, (2020). “Reattori a sali fusi”, *Associazione italiana nucleare* [online]. [Consultato il 4 ottobre 2022]. Disponibile da: <http://www.associazioneitaliananucleare.it/reattori-a-sali-fusi/>

- Atomic Heritage Foundation, (2018). “Indian Nuclear Program”, *Atomic Heritage Foundation* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.atomicheritage.org/history/indian-nuclear-program>
- Baguenier, H., (2022). “Francia e nucleare: una realtà del tutto peculiare”. *Treccani, l'Enciclopedia italiana* [online]. [Consultato il 17 settembre 2022] Disponibile da: https://www.treccani.it/magazine/atlanter/geopolitica/Francia_nucleare.html
- BBC News, (2018). “Japan confirms first Fukushima worker death from radiation”. *BBC.com* [online]. [Consultato il 26 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.bbc.com/news/world-asia-45423575>
- Bevilacqua, F., (2011). “Energia nucleare, un prezzo troppo alto da pagare”. *il Cambiamento* [online]. [Consultato il 27 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.ilcambiamento.it/articoli/costi_energia_nucleare
- Bonfranceschi, A. L., (2014). “L’incidente nucleare di Three Mile Island”. *Wired Italia* [online]. Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.wired.it/attualita/ambiente/2014/03/28/lincidente-three-mile-island/>
- Buoninconti F., (2016). “Quel rapporto dimenticato nel cassetto”. *Arpa.umbria.it* [online] [Consultato il 26 giugno 2022]. Disponibile da: <https://www.arpa.umbria.it/resources/docs/micron%2044/MICRON44-06.pdf>
- Campana, S., (2022). “Perché abbiamo paura del nucleare? Lo abbiamo chiesto al Dott. Luca Romano, in arte “L’Avvocato dell’Atomo””. *Habitante* [online]. [Consultato il 27 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.habitante.it/interviste-dossier/perche-abbiamo-paura-delnucleare-lo-abbiamo-chiesto-al-dott-luca-romano-in-arte-lavvocato-dellatomo/>
- Castleberry G. W., (2021). “Nuclear Plant Security Systems”. *Online PDH Provider for Engineers Land Surveyors Architects*. [Consultato il 24 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.pdhonline.com/courses/e182/e182content.pdf>
- Centini, A., (2022). “Perché le centrali nucleari costano così tanto”. *Fanpage* [online]. [Consultato il 29 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.fanpage.it/innovazione/scienze/perche-le-centrali-nucleari-costano-cosi-tanto/>
- CGIL Emilia-Romagna, (2020). “Le navi a perdere di Francesco Fonti (seconda parte)”. *er.cgil.it* [online]. [Consultato il 9 settembre 2022] Disponibile da: https://www.er.cgil.it/categoria_news/3028-le-navi-a-perdere-di-francesco-fonti-seconda-parte-cgil-emilia-romagna.html
- Ciotti M., Manzano J. L., Ruberti E., (2017). “Sostenibilità dei reattori nucleari a piombo”. *Associazione italiana nucleare* [online]. p. 3–7. [Consultato il 4 ottobre 2022]. Disponibile da: <http://www.associazioneitaliananucleare.it/wp-content/uploads/2019/07/Quaderno-AINn.9.pdf>
- Commissione europea, (2021). “In evidenza: Energia da fusione e progetto ITER”. *Commissione europea* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da:

https://ec.europa.eu/info/news/focus-fusion-power-and-iter-project-2021-mai-17_it

CORDIS European Commission, (2006). [online]. [Consultato il 16 settembre 2022]. Disponibile da: <https://cordis.europa.eu/article/id/25525-effects-of-chernobyl-worse-than-expected/it>

CORDIS European Commission., (2019). [online]. [Consultato il 25 settembre 2022] “Contenimento all’interno del contenitore per centrali nucleari di potenza elevata”. Disponibile da: <https://cordis.europa.eu/article/id/258412-invessel-retention-for-highpower-nuclear-plants/it>

Corriere della Sera, (2009). “Nucleare: i tre referendum del 1987”. *Corriere.it* [online]. [Consultato il 20 settembre 2022] Disponibile da: <https://www.corriere.it/cronache/09-febbraio-24/scheda-referendum-nucleare-6865d61c-02b2-11de-adb7-00144f02aabc.shtml>

Cremonesi L., (2022). “Zaporizhzhia, resta l’incubo della centrale nucleare”, *Oggi – Attualità* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.oggi.it/attualita/notizie/2022/09/25/zaporizhzhia-resta-lincubo-della-centrale-nucleare/>

Department of Energy, (2015). “Accident Investigations of the February 14, 2014, Radiological Release at the Waste Isolation Pilot Plant, Carlsbad, NM” [online]. *Energy.gov*. [Consultato il 13 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.energy.gov/ehss/downloads/accidentinvestigations-february-14-2014-radiological-release-waste-isolation-pilot>

Deposito Nazionale, (2015). “Scriviamo insieme un futuro più sicuro per Italia”. *Deposito Nazionale.it* [online]. [Consultato il 10 agosto 2022]. Disponibile da: https://www.depositonazionale.it/raccoltadocumenti/norme/gu19-8-2015_dm_7_agosto_2015_su_classificazione_ri_fiuti-radioattivi.pdf

Dresbach, F., (2018). “Principali reazioni termonucleari nelle stelle“. *Tesi di Laurea, Alma Mater Studiorum*. [Consultato l'11 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://ams-laurea.unibo.it/17042/1/Principali%20Reazioni%20Termonucleari%20Nelle%20Stelle.pdf>

Dulon, K., (2011). “Money talks”. *ITER* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.iter.org/newsline/162/576>

Eisenhower Dwight D., (1953). “Atoms for Peace Speech”. *International Atomic Energy Agency* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>

ENEA, (2011). “Costi”. [online]. *ENEA*. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/fissione-nucleare/costi/#tre>

ENEA, (2011). “La sicurezza” [online]. *ENEA*. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.enea.it/it/seguici/le-parole-dellenergia/fissione-nucleare/la-sicurezza-1>

- Energia, (2018). “Breve storia del nucleare in Italia: l’esordio”, *Rivistaenergia.it* [online]. [Consultato il 20 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.rivistaenergia.it/2018/09/breve-storia-del-nucleare-in-italia-lesordio/>
- Energia, (2018). “Breve storia del nucleare in Italia: l’epilogo”. *Rivistaenergia.it* [online]. [Consultato il 20 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.rivistaenergia.it/2018/09/breve-storia-del-nucleare-in-italia-lepilogo/>
- ESA. “Annual Report 2020”, (2021). *euratom-supply.ec.europa.eu* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022] Disponibile da: https://euratom-supply.ec.europa.eu/publications/esa-annualreports_en.
- EURATOM, (2007). “Trattato che istituisce la Comunità europea dell’energia atomica, Trattato istitutivo”. *eur-lex.europa.eu* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0024>
- Euronews, (2022). “Centrale di Zaporizhzhia, ecco cosa farà l’Agenzia dell’energia atomica”. *Euronews* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://it.euronews.com/2022/09/02/centrale-di-zaporizhzhia-ecco-cosa-fara-la-agenzia-dellenergia-atomica>
- EuropeToday, (2022). “Gli Usa sfidano la Francia anche sul nucleare: "Lo porteremo noi in Polonia e in altri Paesi Ue””. *EuropaToday.it* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022] Disponibile da: <https://europa.today.it/ambiente/usa-francia-nucleare-polonia-ue.html>
- Fatiguso, R., (2022). “Nucleare cinese, la Gran Bretagna approva il reattore Hualong One”. *Il Sole 24 ORE* [online]. Consultato il 19 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.ilsole24ore.com/art/nucleare-cinese-gran-bretagna-approva-reattore-hualong-one-AE3f0ICB>
- Focus, (2010). “Energia nucleare e CO2: quanto è verde l’atomo?”. *Focus.it* [online]. [Consultato il 26 giugno 2022] Disponibile da: <https://www.focus.it/ambiente/natura/energia-nucleareco2-effetto-serra-2010081454>
- Focus, (2002). “Quali sono gli impieghi dell’acqua pesante?” - *Focus.it* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.focus.it/scienza/scienze/quali-sono-gli-impieghidell-acqua-pesante>
- France 24, (2008). “Nuclear spillage from French power station”. *France 24* [online]. [Consultato il 26 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.france24.com/en/20080709-nuclear-spillage-french-power-station-france-nuclear>
- Galliano, A., (2022). “Come e quanto gas arriva in Italia dalla Russia: domande e risposte”. *la Repubblica* [online]. [Consultato l’11 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.repubblica.it/green-andblue/2022/03/04/news/gas_russo_in_italia_domande_e_risposte-340320284/

- Gandolfi A., (2021). “Otto Hahn - AIF - Associazione per l'Insegnamento della Fisica” [online]. [Consultato il 6 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.aif.it/fisico/biografia-otto-hahn/>
- Gandolfi S., (2022). “Nuova centrale nucleare in Finlandia La prima in Europa dopo 15 anni”. *Corriere della Sera* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.corriere.it/esteri/22_marzo_14/nuova-centrale-nucleare-finlandia-prima-europa-15-anni-2e04e43c-a370-11ec-9af1-c1077f9ccdda.shtml#:~:text=Situata%20sulla%20costa%20occidentale%20della,originariamente%20essere%20inaugurato%20nel%202009.
- Gangemi P., (2011). “Germania: ancora polemiche”. *NuclearNews* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022] Disponibile da: <https://web.archive.org/web/20160304134948/http://www.nuclearnews.it/news-2691/germania-ancora-polemiche/>
- Gangemi P., (2011). “Svolta tedesca: le reazioni”. *NuclearNews* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022] Disponibile da: <https://web.archive.org/web/20160304191343/http://www.nuclearnews.it/news-2688/svoltatedesca-le-reazioni/>
- Government of Canada, (2022). “Canada’s Small Modular Reactor Action Plan”. *Natural Resources Canada / Sélection de la langue - Ressources naturelles Canada* [online]. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.nrcan.gc.ca/our-naturalresources/energy-sources-distribution/nuclear-energy-uranium/canadas-small-nuclear-reactoraction-plan/21183>
- Green Planner, (2018). “Consumo energia elettrica: informazioni e dati statistici in Italia”. *Magazine Green Planner* [online]. [Consultato l'11 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.greenplanner.it/consumo-energia-elettrica-italia/>
- Greenreport, (2022). L’embargo che non c’è: la Russia inizia la costruzione della prima centralenucleare egiziana. *Greenreport* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://greenreport.it/news/energia/lembargo-che-non-ce-la-russia-inizia-la-costruzione-dellaprima-centrale-nucleare-egiziana/>
- Greenreport, (2022). “UK: via libera alla nuova centrale nucleare di Sizewell C, nonostante il no del Planning Inspectorate”. *Greenreport* [online]. [Consultato il 29 settembre 2022]. Disponibile da: <https://greenreport.it/news/energia/uk-via-libera-alla-nuova-centrale-nucleardi-sizewell-c-nonostante-il-no-del-planning-inspectorate/>
- Gregory S., (2009). “The Terrorist Threat to Pakistan’s Nuclear Weapons – Combating Terrorism Center at West Point”. *Combating Terrorism Center at West Point* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.ctc.usma.edu/the-terrorist-threat-to-pakistansnuclear-weapons/>
- GSE, (2020). “Rapporto Statistico GSE – FER”. *Gse.it*. Disponibile da: https://www.gse.it/documenti_site/Documenti%20GSE/Rapporti%20statistici/Rapporto%20Statistico%20GSE%20-%20FER%202020.pdf

- Heil A. & Service R. A., (2020). “Idle Threat? Azerbaijan's Hint At Missile Strike On Armenian Nuclear Plant Increases Tensions”. *RadioFreeEurope/RadioLiberty* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.rferl.org/a/idle-threat-azerbaijani-hint-atmissile-strike-on-armenian-nuclear-plant-increases-tensions/30733672.html>
- IAEA, (2016). “Advanced reactors”. *International Atomic Energy Agency* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://aris.iaea.org/>
- IAEA, (2016). “History”. *International Atomic Energy Agency* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.iaea.org/about/overview/history>
- IAEA, (2021). “Getting to the Core of Radioactive Waste Managing the by-products of nuclear technologies to protect people and the environment”. *International Atomic Energy Agency* [online]. [Consultato il 10 agosto 2022]. Disponibile da: <https://www.iaea.org/sites/default/files/18/10/radioactivewaste.pdf>
- IAEA, (2021). “What are Small Modular Reactors (SMRs)?”. *International Atomic Energy Agency* [online]. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.iaea.org/newscenter/news/what-are-small-modular-reactors-smrs>
- Iezzi L., (2009). “Intesa Berlusconi-Sarkozy l'Italia riapre al nucleare”. *la Repubblica* [online]. [Consultato il 27 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.repubblica.it/2008/06/sezioni/ambiente/nucleare2/intesa-italia-francia/intesaitalia-francia.html>
- Il Post, (2022). “La Germania terrà aperte due delle sue ultime tre centrali nucleari”. *IlPost.it*. Disponibile da: <https://www.ilpost.it/2022/09/06/germania-attive-ultime-centrali-nucleari/>
- International Atomic Energy Agency, (1981). “Classification of Radioactive Waste, Guide”.
- Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, (2022). “Radioprotezione e radioattività ambientale. Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione” [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.isinucleare.it/it/radioprotezione-radioattivita-ambientale>
- Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, (2022). “Rendiconto finanziario gestionale spese 2021” [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.isinucleare.it/sites/default/files/contenuto_redazione_isin/rendiconto_finanziario_gestionale_spese_2021.pdf
- ISPI. “Clima: La tempesta perfetta”. *ISPI*. Disponibile da: <https://www.ispionline.it/it/pubblicazione/clima-la-tempesta-perfetta-35104>
- ITER, (2022). “Frequently Asked Questions” [online]. *ITER*. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.iter.org/faq#Do_we_really_know_how_much_ITER_will_cost

- La Repubblica, (2022). “Tassonomia verde, Greenpeace pronta all'azione legale contro la Commissione UE”. *Repubblica.it* [online]. [Consultato il 15 settembre 2022] Disponibile da: https://www.repubblica.it/green-and-blue/2022/07/06/news/tassonomia_verde_greenpeace-356863160/#:~:text=Tassonomia%20verde,%20Greenpeace%20pronta%20all'azione%20legale%20contro%20la%20Commissione%20Ue,-La%20ong%20contro&text=Greenpeace%20annuncia%20un'azione%20legale,investimenti%20ritenuti%20sostenibili%20dall'Ue.
- Lanzavecchia O., (2021). “Pechino spera nella svolta nucleare con un reattore sperimentale”. *Formiche.net* [online]. [Consultato il 4 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://formiche.net/2021/10/nucleare-cina-reattore-torio-sali-fusi/>
- Legambiente, (1995). “Rifiuti radioattivi: il caso Italia”. *legambiente.it* [online]. [Consultato il 14 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/dossier_rifiuti_radioattiviil_caso_italia_giu_1995.pdf
- Legambiente, (2007). “I problemi irrisolti del nucleare a vent’anni dal referendum”. *legambiente.it* [online]. [Consultato il 26 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.legambiente.it/sites/default/files/docs/Incidenti_nucleari_degli_ultimi_50_anni.0000002415.pdf
- Legambiente, (2021). “Rifiuti radioattivi ieri, oggi e domani: un problema collettivo”. *legambiente.it* [online]. [Consultato il 14 settembre 2022] Disponibile da: https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2021/03/Rifiuti-radioattivi-ieri-oggi-edomani_2021.pdf
- Lepri F., (2021). “Sondaggio BiDiMedia: Italia ancora spaccata sul Nucleare a Fissione, la Fusione incontra più favorevoli”. *Sondaggi Bidimedia* [online]. [Consultato il 13 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://sondaggibidimedia.com/sondaggio-bidimedia-ottobre-nucleare/>
- Levitan D., (2020). “First U.S. Small Nuclear Reactor Design Is Approved”. *Scientific American* [online]. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.scientificamerican.com/article/first-u-s-small-nuclear-reactor-design-is-approved/>
- MacPherson H. G., (1985). “The Molten Salt Reactor Adventure”. *Wayback machine* [online]. [Consultato il 4 ottobre 2022]. Disponibile da: https://web.archive.org/web/20110604035730/http://home.earthlink.net/~bhoglund/mSR_Adventure.html
- Martiny F. (2021). “Allarme spopolamento nelle aree rurali: le campagne europee sono sempre più disabitate”. *euractiv.it* [online]. [Consultato il 22 settembre 2022]. Disponibile da: <https://euractiv.it/section/economia-e-sociale/news/allarme-spopolamento-nelle-aree-rurali-lecampagne-europee-sono-sempre-piu-disabitate/>
- Mastri G., (2022). “Fusione nucleare, via al progetto europeo Demo”. *The Watcher Post* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.thewatcherpost.it/innovazione/fusione-nucleare-demo/>

- Moles S., (2022). “Cina ed energia nucleare: una panoramica”. *China Files* [online]. [Consultato il 19 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.china-files.com/cina-ed-energia-nucleare-una-panoramica/#:~:text=Oggi%20la%20Cina%20è%20il,impianto%20è%20ancora%20stato%20disMESSO.>
- NASA Earth Observatory, (2000). “Svante Arrhenius”. *Earthobservatory.nasa.gov* [online]. [Consultato il 26 giugno 2022]. Disponibile da: https://earthobservatory.nasa.gov/features/Arrhenius/arrhenius_2.php
- Niels Bohr Library & Archives, (2021). “Roger Revelle's Discovery”. *history.aip.org* [online]. [Consultato il 26 giugno 2022] Disponibile da: <https://history.aip.org/climate/Revelle.htm>
- Open, (2021). “Cingolani agli studenti: «Il nucleare è il futuro. Le nuove centrali saranno la soluzione a tutti i problemi»”. *Open.it* [online]. [Consultato il 20 settembre 2022] Disponibile da: <https://www.open.online/2021/12/13/roberto-cingolani-nucleare-nuova-generazione/>
- Paccariè L. (2021). “Atteso 12 anni, pagato 3 volte. Parte maxi-reattore nucleare in Finlandia”. *Huffington Post* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.huffingtonpost.it/entry/dodici-anni-di-ritardo-e-costi-triplicati-entra-in-funzioneil-reattore-ol3-in-finlandia_it_61c1d8cae4b04b42ab64c58e/
- Pagni L., (2021). “La centrale nucleare galleggiante di Putin, l'arma per la conquista dell'Artico e delle sue risorse”. *la Repubblica*. [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.repubblica.it/esteri/2021/12/02/news/la-centrale-nucleare-galleggiante-di-putinl-arma-segreta-per-la-conquista-dell-artico-e-le-sue-risorse-328662970/>
- Power Technology, (2011). “Belchatów Power Plant”. *power-technology.com* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.powertechnology.com/projects/belchatow-plant/>
- Public Citizen, (2005). “Nuclear Giveaways in the Energy Policy Act of 2005”. p.1–2. *Citizen.org* [online]. [Consultato il 19 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.citizen.org/wp-content/uploads/nuclearenergybillfinal.pdf>
- QualEnergia, (2011). “Germania, ecco la strada per uscire dal nucleare”. *Qual Energia* [online]. [Consultato il 16 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.qualenergia.it/articoli/20110418-germania-ecco-la-strada-uscire-dal-nucleare/>
- QualEnergia, (2022). “Nucleare, ancora ritardi a Flamanville: siamo a oltre 10 anni e un costo 4 volte maggiore”. *Qual Energia* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.qualenergia.it/articoli/nucleare-ancora-ritardi-flamanville-oltre-10-anni-costera-4-volte-quanto-preventivato/>
- Quintieri L. (2010). “I reattori termici ad acqua leggera (LWR)”. *Scienza per tutti* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://scienzaper tutti.infn.it/schedeapprofondimento/666-i-reattori-termici-ad-acqua-leggera->

- Sarkozy N., (2008). “Discorso di Cherbourg”. Disponibile da: https://www.diplomatie.gouv.fr/IMG/pdf/Speech_by_Nicolas_Sarkozy_presentation_of_Le_Terrible_submarine.pdf
- Sassi F., (2022). “Macron presidente conferma che il futuro della Francia sarà nucleare”. *Wired* [online]. [Consultato il 17 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.wired.it/article/nucleare-macron-presidente-francia-energia/>
- Sciencedirect. “Capacity Factor”. *Sciencedirect* [online]. [Consultato il 26 luglio 2022]. Disponibile da: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/capacity-factor>
- SkyTG24, (2022). “Aiea: La situazione nella centrale di Zaporizhzhia è insostenibile”. *Sky TG24* [online]. [Consultato il 25 settembre 2022]. Disponibile da: <https://tg24.sky.it/mondo/2022/09/06/centrale-nucleare-zaporizhzhia-ucraina-aiea>
- Sturloni G. (2019). “Quante persone sono davvero morte a causa del disastro nucleare di Chernobyl?” *Wired Italia*. Disponibile da: <https://www.wired.it/scienza/medicina/2019/06/25/chernobyl-quante-persone-morte/>
- Terna, (2018). “Statistiche Regionali 2018“. *Terna* [online]. p.10 [Consultato l'11 ottobre 2022]. Disponibile da: https://download.terna.it/terna/Statistiche%20Regionali_2018_8d7b93cbf9ad480.pdf
- Trading Economics, (2022). “Uranio - Contratto Future - Prezzi | 1988-2022 Dati | 2023-2024 Previsione, Indicatori economici, IT”. *Trading Economics* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://it.tradingeconomics.com/commodity/uranium>
- U.S. Department of Energy, (2021). “3 Advanced Reactor Systems to Watch by 2030”. *Energy.gov* [online]. [Consultato il 10 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.energy.gov/ne/articles/3-advanced-reactor-systems-watch-2030>
- Virtuani, P.. “Nucleare: 60 anni fa la prima centrale per uso civile”. *Corriere della Sera* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.corriere.it/scienze/14_agosto_04/nucleare-60-anni-fa-prima-centrale-uso-civile-0f17831c-1be3-11e4-91c9-c777f3f2edee.shtml
- Whitehouse.gov., (2015). “FACT SHEET: Obama Administration Announces Actions to Ensure that Nuclear Energy Remains a Vibrant Component of the United States’ Clean Energy Strategy”. *obamawhitehouse.archives.gov* [online]. [Consultato il 19 settembre 2022]. Disponibile da: <https://obamawhitehouse.archives.gov/the-press-office/2015/11/06/fact-sheet-obama-administration-announces-actions-ensure-nuclear-energy>
- Whitlock J. J. W., (2010). “The Evolution of CANDU Fuel Cycles and Their Potential Contribution to World Peace”. *The Canadian Nuclear FAQ* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.nuclearfaq.ca/brat_fuel.htm

- World Meteorological Organization, (2021). “The State of the Global Climate 2021”. *wmo.int* [online]. [Consultato il 26 giugno 2022]. Disponibile da: <https://public.wmo.int/en/ourmandate/climate/wmo-statement-state-of-global-climate>
- World Nuclear Association, (2017). “Nuclear Power Reactor Characteristics”. *World Nuclear Association* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: [https://www.worldnuclear.org/getmedia/80f869be-32c8-46e7-802d-eb4452939ec5/Pocket-Guide-Reactors.pdf.aspx#:~:text=In%20GCRs%20\(gas-cooled%20reactors,AGRs\)%20fuel%20to%20be%20used](https://www.worldnuclear.org/getmedia/80f869be-32c8-46e7-802d-eb4452939ec5/Pocket-Guide-Reactors.pdf.aspx#:~:text=In%20GCRs%20(gas-cooled%20reactors,AGRs)%20fuel%20to%20be%20used).
- World Nuclear Association, (2021). “Economics of Nuclear Power”. *World Nuclear Association* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.worldnuclear.org/information-library/economic-aspects/economics-of-nuclear-power.aspx?fbclid=IwAR2aitbF4X7Uw5wKA3mSTb_ExDqwm5z2yG4O-SNFKQWNZnpI9FQXjQqaIHJk
- World Nuclear Association, (2021). “Processing of Used Nuclear Fuel”. *World Nuclear Association* [online]. [Consultato il 14 settembre 2022]. Disponibile da: <https://worldnuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/fuel-recycling/processing-of-used-nuclearfuel.aspx>
- World Nuclear Association, (2022). “Nuclear Power in Russia | Russian Nuclear Energy”. *World Nuclear Association* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.world-nuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/russianuclear-power.aspx>
- World Nuclear Association, (2022). “Nuclear Power in South Korea”. *World Nuclear Association* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.worldnuclear.org/information-library/country-profiles/countries-o-s/south-korea.aspx>
- World Nuclear News, (2010). “Monju back after 14 years”. *world-nuclear.org* [online]. [Consultato il 4 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.world-nuclear-news.org/RS_Monju_back_after_14_years_0605101.html
- World Nuclear News, (2010). “New partner for potential Polish nuclear build”. *worldnuclear.org* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.worldnuclear-news.org/NN-New_partner_for_potential_Polish_nuclear_build-0803107.html
- World Nuclear News, (2010). “Poland’s nuclear site study”. *world-nuclear.org* [online]. [Consultato il 18 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.world-nuclearnews.org/NN_Polands_nuclear_site_study_1703101.html

SITOGRAFIA

- Azione – Italia Viva, (2022). “Programma elettorale”, nella sezione: Energia e ambiente. p.10. [online] Disponibile da: https://issuu.com/azione_it/docs/impaginato
- Electricity Maps. “Live 24/7 CO₂ emissions of electricity consumption”. *electricity-maps.com* [online]. [Consultato il 17 settembre 2022] Disponibile da: <https://app.electricitymaps.com/map>
- EUROfusion. “JET History”. *EUROfusion* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/jet-history/>
- Forza Italia, (2022). “Accordo quadro di programma per un governo di centrodestra, nella sezione: La sfida dell'autosufficienza energetica”. p.12. [online] Disponibile da: http://www.forzaitalia.it/speciali/PER_L_ITALIA_Accordo_quadro_di_programma_per_un_Governo_di_centrodestra.pdf
- Fratelli d'Italia, (2022). “Programma Fratelli d'Italia 2022 nella sezione: Energia pulita, sicura e a costi sostenibili”. p.26. [online] Disponibile da: <https://www.fratelli-italia.it/programma/>
- Geopop, (2021). “Fusione nucleare: quando terminerà il progetto ITER e avremo i primi reattori a energia pulita?”. *YouTube* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.youtube.com/watch?v=MFSwkFK7_ws
- Green communities, (2022). *Greencommunities.it* [online]. [Consultato il 22 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.greencommunities.it/>
- Ingegneria Italia, (2022). “I grossi rischi del più grande reattore a fusione nucleare d'Europa”. *YouTube* [online]. [Consultato il 12 ottobre 2022]. Disponibile da: https://www.youtube.com/watch?v=DYyMbcGc_ts
- Lega, (2022). “Programma di governo, nella sezione: Energia per un'Italia forte e competitiva, tra pragmatismo e sostenibilità”. p.44. Disponibile da: https://static.legasonline.it/files/Programma_Lega_2022.pdf
- Rai, (2022). “La rinascita nucleare”. Presadiretta – 11/09/2022. *YouTube* [online]. [Consultato il 14 settembre 2022]. Disponibile da: https://www.youtube.com/watch?v=tEfEEo--h_M
- Sogin. “Deposito Nazionale e Parco Tecnologico”. *Sogin.it* [online]. [Consultato il 13 settembre 2022]. Disponibile da: <https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclounucleare/depositonazionaleeparcotecnologico/Pagine/default.aspx>
- Sogin. “Siti nucleari”. *Sogin.it* [online]. [Consultato il 20 settembre 2022]. Disponibile da: [https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclounucleare/sitinucleariitaliani/Pagine/default.aspx#:~:text=Sogin%20è%20responsabile%20del%20decommissioning,di%20Bosco%20Marengo%20\(AL\).](https://www.sogin.it/it/chiusuradelciclounucleare/sitinucleariitaliani/Pagine/default.aspx#:~:text=Sogin%20è%20responsabile%20del%20decommissioning,di%20Bosco%20Marengo%20(AL).)

Wikipedia. “Lista di centrali nucleari”. *Wikipedia, l'enciclopedia libera* [online]. [Consultato l'11 ottobre 2022]. Disponibile da: https://it.wikipedia.org/wiki/Lista_di_centrali_nucleari

Wikipedia. “Reattore nucleare RBMK”. *Wikipedia, l'enciclopedia libera* [online]. [Consultato il 3 ottobre 2022]. Disponibile da: https://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_RBMK

WISE Uranium Project, (2022). “Uranium Maps and Statistics”. *WISE Uranium Project* [online]. [Consultato il 1 ottobre 2022]. Disponibile da: <http://www.wise-uranium.org/umaps.html?set=ures>

RINGRAZIAMENTI

A conclusione di questo elaborato vorrei rivolgere i miei ringraziamenti a coloro i quali mi hanno aiutato, in un modo o in un altro, a svolgere il mio lavoro e la mia ricerca e senza i quali, per diversi motivi, non sarei riuscito a ottenere questo risultato.

In primis, vorrei ringraziare la mia relattrice, la Prof.ssa Patrizia Messina, la quale mi ha aiutato, con dedizione e incredibile disponibilità, a circoscrivere il mio campo di ricerca e a indirizzarmi verso soluzioni stilistiche e tematiche a me poco familiari. Grazie per avermi seguito durante tutto il processo di elaborazione.

Ringrazio poi il Prof.re Arturo Lorenzoni per avermi indicato come procedere su un tema particolarmente difficile e su cui ero poco informato.

Vorrei poi ringraziare i miei genitori, senza i quali oggi non sarei potuto arrivare a questo punto nonostante i miei sforzi. Grazie per esserci stati, per avermi lasciato la libertà di seguire la mia strada e per avermene anche dato la possibilità economica.

Ringrazio mia sorella per essere sempre pronta ad ascoltare i miei sfoghi e le mie frustrazioni, spero di risultare altrettanto d'aiuto nei momenti di necessità.

Ringrazio poi la mia ragazza, Giulia, per avermi sempre spronato a lavorare anche quando avevo poca voglia, per avermi aiutato a correggere i miei errori di battitura e per aver ascoltato i miei lunghi messaggi vocali in cui chiedevo consigli su come impostare il mio lavoro. Grazie per essermi stata vicina.

Ringrazio i miei cari amici, Antonino, Carlo, Lorenzo, Vincenzo e Rita per la vicinanza, per i consigli e per avermi fatto compagnia in questi mesi di duro lavoro.

Ringrazio anche Edoardo, Simone e Valerio con i quali condivido la mia passione per la musica e grazie ai quali sono riuscito a staccare un po' dalla routine e dalla fatica.

Ringrazio infine i ragazzi de "L'avvocato dell'Atomo" per avermi fornito indicazioni su come reperire e ricercare dati e materiale scientifico per il mio lavoro di tesi.