

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI SCIENZE POLITICHE,
GIURIDICHE E STUDI INTERNAZIONALI

Corso di laurea *Triennale* in Scienze politiche, Relazioni
internazionali, Diritti umani



IL DIRITTO DEL NUCLEARE.

LE MODERNE ESIGENZE AMBIENTALI ED ECONOMICHE
RICHIEDONO SCELTE IMPORTANTI ED AZIONI CONCRETE: IL
POTENZIAMENTO DELLA PRODUZIONE DI ENERGIA DAL
NUCLEARE PUO' ESSERE UNA DI QUESTE?

Relatore: Antonio Galgaro

Laureanda: GIULIA DANIELLI
Matricolo N. 2009141

Anno 2022-2023

INDICE

Introduzione	pag. 2
1.CAPITOLO I: Conoscere il passato, per leggere il presente e ragionare sul futuro	
1.1 Viaggio al centro dell'atomo	pag. 5
1.2 La Fissione nucleare	pag. 12
1.3 Metro di misura per eventi negativi: INES	pag. 14
1.3.1 Le note dolenti	pag. 17
1.4 La pubblica percezione e l'effetto NIMBY	pag. 23
2.CAPITOLO II: Cosa serve sapere	
2.1 Tecnologia e design	pag. 27
2.2 Confronto tra fonti energetiche	pag. 36
2.3 Mix energetico: le potenzialità del nucleare	pag. 48
2.4 Ulteriori applicazioni del nucleare	pag. 53
3.CAPITOLO III: Panorama del diritto del nucleare	
3.1 Normative e incentivi a livello mondiale	pag. 55
3.2 Enti regolatori del nucleare	pag. 61
3.3 Situazione legislativa in Italia	pag. 70
3.4 Francia e Germania: due scelte agli antipodi	pag. 75
Conclusioni	pag. 79
Bibliografia	pag. 81
Sitografia	pag. 87
Ringraziamenti	pag. 97

INTRODUZIONE

La principale emergenza che siamo chiamati a gestire oggi è il cambiamento climatico, ed importanti azioni sono necessarie per consentire la sopravvivenza dell'essere umano e della vita nel nostro pianeta. Negli ultimi anni si è sentito spesso parlare delle possibili soluzioni che ogni Nazione deve adottare per ridurre al minimo le emissioni di CO₂ prodotte dall'attività dell'uomo, per contrastare l'effetto serra: l'obiettivo principale è contenere l'aumento medio della temperatura della Terra ben al di sotto dei 2°C rispetto al periodo preindustriale. Specialmente nell'ambito della produzione di energia, responsabile di buona parte delle emissioni, la decarbonizzazione è sicuramente la soluzione migliore per ridurre al minimo l'impatto ambientale, ma è importante non perdere di vista l'esigenza di avere comunque energia disponibile ad un prezzo accettabile, e che non impatti in altri modi negativi nell'ambiente. Oltre alle rinnovabili tradizionali (fotovoltaico, eolico, idroelettrico...), quale altra fonte di energia ci può aiutare in questo epocale cambiamento? Da un po' di mesi a questa parte, a livello europeo, si è tornato a parlare del nucleare, di come sia una delle fonti energetiche più interessanti per l'ambiente e per l'autonomia energetica. Ma siamo sicuri di saperne abbastanza riguardo a questa fonte di energia, che spesso spaventa l'opinione pubblica? La tecnologia è sempre la stessa o ce ne sono diverse? Ha avuto nel tempo aggiornamenti tecnologici? Ce ne saranno altri? Quanto è sicura? Diverse Nazioni, come la Francia, la Cina, la Russia, continuano a puntare sull'atomo come uno degli attori principali del proprio mix-energetico, mentre altre Nazioni si avvicinano all'argomento in modo diverso e decisamente opposto.

Nei tre capitoli che seguono viene presentato un percorso ragionato, con l'intento di offrire un quadro conoscitivo più completo possibile, trattando gli aspetti ritenuti più significativi, per poter consentire al lettore di ritrovare le basi conoscitive necessarie per poi trarre le proprie conclusioni.

Nel primo capitolo viene ricostruita la storia dell'energia nucleare dalla scoperta della radioattività in poi, spiegandone poi come si riesce ad estrarre così tanta energia dall'atomo e descrivendo come l'industria nucleare abbia cambiato la vita dell'uomo, e come l'uomo, a volte, con l'andare del tempo ha cambiato il suo

approccio verso l'industria nucleare a causa di alcuni incidenti che ne hanno modificato radicalmente la percezione.

Nel secondo capitolo viene approfondito, non solo l'energia nucleare, ma anche le capacità e potenzialità delle altre fonti energetiche, soffermandosi su quelle rinnovabili che sono le uniche per le quali si prevede un futuro ad emissioni nulle; mettendole a confronto tra loro utilizzando diversi strumenti, necessari in quanto le fonti energetiche sono estremamente diverse l'una dell'altra. Viene descritto anche quali saranno le nuove tecnologie nucleari, che fanno ben sperare in un futuro ecosostenibile, dove l'approvvigionamento dell'energia non sarà più un problema per l'essere umano. Nel terzo capitolo viene ampliato ulteriormente il quadro riportando le funzioni degli enti di competenza e la normativa che accompagna il ricorso al nucleare nell'evoluzione temporale, dall'estrazione del combustibile primario (Uranio) alla gestione dei rifiuti, dalla produzione di energia agli apparati diagnostici e medici, dalla ricerca tecnologica ai finanziamenti, focalizzando la trattazione alle realtà italiana, francese e tedesca, e, più in generale, a quella europea.

Approcciandosi da profani alla tecnologia nucleare e a tutto l'universo di informazioni ad essa connessa, si rimane piacevolmente sorpresi nello scoprire come l'atomo metta a disposizione delle nazioni una enorme fonte di energia che ne consente lo sviluppo economico, sociale e nel contempo ecologico. Come gli studi tecnici di settore e le commissioni di esperti hanno evidenziato, il mix energetico di rinnovabili e nucleare risulta essere la squadra vincente per avere energia a costi accettabili e stabilità della rete, anche in prospettiva all'aumento dei consumi che si prevede. Molte Nazioni, forti di economie in crescita e governi con ampio potere decisionale, stanno già perseguendo questa strategia. Prima di prendere una legittima decisione collettiva, sia essa positiva o negativa, devono essere ampiamente discussi i pro e i contro di ogni soluzione, e sottolineato che ognuna di esse presuppone una certa dose di accettazione del rischio.

CAPITOLO I

CONOSCERE IL PASSATO, PER LEGGERE IL PRESENTE E RAGIONARE SUL FUTURO

La storia generalmente ci insegna anche a leggere il presente; la storia del nucleare non fa differenza perché ci fa comprendere quanto l'Italia sia stata pioniera nello studio, nello sviluppo e nell'utilizzo dell'energia nucleare già dai suoi albori. Le esperienze maturate nel corso della (non proprio breve) vita della tecnologia del nucleare hanno spinto molto in avanti il progresso del genere umano, non solo nell'ambito energetico ma anche medico e scientifico, ed è già nel quotidiano di molti di noi più di quanto si voglia ammettere.

1.1 Viaggio al centro dell'atomo

Come spesso accade, molte scoperte scientifiche o invenzioni sono frutto di casi fortuiti guidati dall'intuito, dalla ricerca e dalla perspicacia di uno studioso. Materiali radioattivi erano già conosciuti da molto tempo: l'uranio è stato scoperto nel 1789 dallo scienziato M.H. Klaproth, all'interno del minerale estratto dalle miniere chiamato pechblenda. Basandosi sugli studi sulla radioattività iniziati da Antoine Henri Becquerel, Marie Curie¹ insieme al marito Pierre Curie² iniziò lo studio di materiali naturalmente radioattivi arrivando ad isolarne alcuni, tra cui il polonio e il radio. Quest'ultimo si scoprì essere il più semplice dei due ad essere estratto, mentre il polonio si scoprì solo più tardi come sfruttarne le proprietà (emette un solo raggio alfa ad alta energia) utili negli studi per la scoperta della struttura dell'atomo. Il premio Nobel che le venne assegnato insieme al marito Pierre e Antoine Henri Becquerel recita: «in riconoscimento dei servizi straordinari che essi hanno reso nella loro ricerca sui fenomeni radioattivi» (Storica National Geographic, 2022)

¹ Varsavia, 7 novembre 1867 – Passy, 4 luglio 1934

² Parigi, 15 maggio 1859 – Parigi, 19 aprile 1906

A partire da queste scoperte, molti scienziati svilupparono i loro studi dell'ambito della fisica, chimica e radioattività dei materiali; uno tra questi fu Enrico Fermi³ alla quale fu assegnata nel 1926, dal direttore Orso Mario Corbino⁴, la prima cattedra di fisica teorica italiana presso il Regio Istituto di fisica dell'Università di Roma (Dipartimento di Fisica, s.d.). Enrico Fermi, insieme ad un gruppo di ricercatori in fisica e chimica, Edoardo Amaldi, Franco Rasetti, Emilio Segrè, Bruno Pontecorvo, Oscar D'Agostino ed Ettore Majorana, soprannominati anche "i ragazzi della via Panisperna", dal nome della via dove era situato l'istituto, iniziarono una serie di sperimentazioni basati su calcoli e intuizioni volti a scoprire la struttura degli atomi e le loro caratteristiche e potenzialità.

Nel 1934 la figlia primogenita di Marie e Pierre Curie, Irène, insieme al marito Frédéric Joliot scoprirono che era possibile produrre radioattività in modo artificiale in laboratorio bombardando alcuni elementi tramite particelle alfa⁵ a doppia carica positiva. Fermi e il suo gruppo, invece, fecero test di laboratorio utilizzando neutroni invece che particelle alfa: essendo i neutroni a carica neutra, non essendo quindi soggetti alla repulsione magnetica di protoni ed elettroni, riuscivano a generare un maggior numero di collisioni e quindi un maggior livello di radioattività. Oltre a questo, interponendo un materiale che rallentasse la velocità dei neutroni, il materiale bombardato aveva una radioattività ancora più elevata e quindi era più efficiente.

Queste scoperte, brevettate il 26 ottobre 1935, sono la base dello studio e sviluppo dell'energia atomica. Fermi era da molto tempo convinto che, una volta scoperto come liberare l'energia nucleare, si avrebbe avuto a disposizione enormi quantità di energia.

Successivamente il gruppo di via Panisperna iniziò a disgregarsi, prendendo direzioni di studio e di vita diverse. Lo stesso Fermi nel 1939, subito dopo aver ritirato il premio Nobel per la Fisica, si trasferì negli Stati Uniti, anche a causa delle leggi razziali proclamate in Italia che colpivano sua moglie di religione ebraica.

³ Roma, 29 settembre 1901 – Chicago, 28 novembre 1954

⁴ Fisico italiano, direttore dell'istituto di fisica dell'Università di Roma.

⁵ Emesse naturalmente da alcuni materiali a nucleo instabile, normalmente assorbiti e fermati dalla pelle, innocue se non ingerite.

Con l'inizio della Seconda Guerra Mondiale le cose subirono un'accelerazione, i fisici di tutto il mondo collaborano in modo entusiasta a queste enormi scoperte; gli Stati Uniti in particolare finanziarono le ricerche sul nucleare con il famoso progetto Manhattan, su sollecitazione anche di Albert Einstein con una lettera al presidente Roosevelt, nella quale indicava la realizzazione della bomba atomica come unica soluzione per fermare la Germania nazista.

Fermi risolse uno dei primi obiettivi del progetto Manhattan: cioè, la creazione di una reazione nucleare a catena auto-alimentata (Chicago Pile 1 – CP1). Con questo esperimento iniziò l'era dell'energia nucleare. Nei laboratori di Los Alamos gli scienziati del progetto Manhattan arrivarono alla produzione dei primi ordigni atomico, che vennero poi tristemente impiegati in Giappone su Hiroshima e successivamente su Nagasaki.

Nel secondo dopoguerra le principali Nazioni mondiali cominciarono a dotarsi di tecnologia nucleare sia per fini bellici, fino al raggiungimento di una sorta di equilibrio tra le superpotenze⁶, sia per la produzione di energia elettrica necessaria allo sviluppo economico.

In Italia nell'immediato dopoguerra i risultati ottenuti con la creazione delle bombe atomiche fecero subito pensare alle applicazioni pacifiche di queste enormi potenze, e vennero creati una serie di enti: primo tra tutti il Centro Informazioni Studi ed Esperienze (CISE) nel 1946. Nel nome volutamente non fu inserito un riferimento all'atomo e al nucleare poiché le Nazioni vincitrici della guerra non volevano che l'Italia si dotasse in autonomia della tecnologia necessaria all'arricchimento dell'uranio e quindi potenzialmente di dotarsi di armi nucleari. Costituita come S.r.l., era una *partnership* tra alcune aziende private ed università⁷, era composta da studiosi e ricercatori che cercavano il modo di sfruttare le conoscenze per applicazioni ingegneristiche, e quindi allo sviluppo delle tecnologie per la

⁶ La folle rincorsa tra le superpotenze agli armamenti nucleari inanellando una serie di esperimenti di esplosioni nucleari in superficie o in profondità della terra o del mare, portarono all'assunzione di un concetto "Mutual assured destruction", cioè una distruzione reciproca assicurata in caso di conflitto. In effetti una guerra iniziata con queste armi avrebbe provocato una distruzione totale del pianeta.

⁷ Entrarono a far parte della società l'Azienda elettrica milanese, Fiat, Edison, Montecatini, Terni, Pirelli, Cogne, Sade, Falck.

trasformazione dell'energia nucleare in energia elettrica. Successivamente al CISE, fu creato nel 1951 da parte del Ministero dell'Università e della Ricerca, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), con lo scopo di finanziare e coordinare le attività di ricerca delle Università di Roma, Padova, Torino e Milano. Nel 1952 il clima post-bellico era cambiato, e venne istituito il Comitato Nazionale per le Ricerche Nucleari (CNRN), allo scopo di realizzare, e promuovere, ricerche in ambito nucleare, poi incorporato al neonato Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare (CNEN) nel 1960. Nel 1982 poi, questo comitato si è trasformato nell'odierno Energia Nucleare ed Energie Alternative (ENEA).

I paesi che studiavano l'applicazione dell'energia nucleare svilupparono conoscenze e tecnologie diverse, e si arrivò alla progettazione delle prime centrali nucleari. Il metodo di trasformazione dell'energia nucleare in energia elettrica è del tutto simile ad una centrale termoelettrica che usi la combustione di derivati del petrolio, carbone, gas o legna: infatti si deve utilizzare il calore per scaldare l'acqua che diventa vapore acqueo; la pressione generata serve per azionare delle turbine che a loro volta generano energia elettrica. Le centrali nucleari usano la forza dell'energia atomica per produrre calore; la sfida che si poneva era governare la reazione dell'atomo mantenendola stabile, e modulandola al bisogno per produrre più o meno energia termica e, una volta trasformata, energia elettrica: il tutto ovviamente nella massima sicurezza possibile. La prima centrale elettrica da un reattore nucleare fu attivata in una stazione sperimentale nell'Idaho (USA) nel 1951 con una produzione di 100 kW. Successivamente, nel 1954 fu l'Unione Sovietica a dotarsi di una centrale nucleare che produceva 5 MW; e nel 1956 fu l'Inghilterra ad attivare una centrale che produceva inizialmente 50 MW che poi arrivò a 200 MW e fu collegata alla rete elettrica nazionale.

In questi anni di frenetica attività di ricerca e sperimentazione, prendeva coscienza l'importanza di governare questa accelerazione tecnologica che le scoperte della fisica stavano per portare nella vita di tutti i giorni. Non solo, con i test fatti in Unione Sovietica con la bomba all'idrogeno, centinaia di volte più potente di quelle esplose in Giappone e che presto anche altre Nazioni oltre agli Stati Uniti avrebbero avuto, rese chiara l'esigenza di arrivare ad un compromesso, ad un accordo. Famoso è il discorso che fece il Presidente degli Stati Uniti Dwight David Eisenhower nel

1953, che tramite lo slogan “*Atoms for Peace*” volle racchiudere un pensiero: «*Non è sufficiente togliere l'arma atomica dalle mani dei militari, va messa nelle mani di coloro che sanno adattarla alle arti della pace.*»⁸

Con questo auspicio e l'appoggio dell'opinione pubblica, le Nazioni Unite convocarono nel 1955 la Prima Conferenza di Ginevra, due settimane di incontri e conferenze dove 1500 delegati di tutto il mondo condivisero dati, studi e soluzioni ingegneristiche, per consentire a tutti i popoli di accedere a questa nuova fonte di energia a basso costo. A detta del presidente della conferenza, il fisico indiano Homi Jehangir Bhabha, si respirava un'atmosfera di grande ottimismo: c'era la convinzione che l'energia atomica fosse la porta di accesso allo sviluppo per i paesi ancora poveri che volevano industrializzarsi. Lo stesso Winston Churchill espresse questa convinzione: «*L'energia atomica sarà una fontana perenne per la prosperità del mondo.*»⁹

Successivamente alla conferenza, il clima internazionale nei confronti del nucleare iniziò a cambiare: la ricerca e le sperimentazioni, coperte in tutte le Nazioni da segreto militare, furono rese condivisibili nel reciproco interesse. Alla fine dei lavori della Conferenza di Ginevra, alcune Nazioni con disponibilità di tecnologia nucleare, cioè Stati Uniti, Francia ed Inghilterra, coinvolsero le cinque Nazioni con la maggior riserva di Uranio, cioè Australia, Canada, Sudafrica, Portogallo e Belgio, in una discussione volta alla creazione di un'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (*International Atomic Energy Agency - IAEA*) che avesse nel proprio statuto la promozione e regolamentazione della tecnologia nucleare e del mercato dell'uranio, e ne mantenesse la sorveglianza. Anche l'Unione Sovietica entrò a far parte delle nazioni fondatrici della IAEA, apportando il proprio contributo.

Cosa stava succedendo in Italia nel frattempo? Già durante i primi anni del 1940 la fisica italiana vide ridurre sempre di più i suoi finanziamenti e le sue possibilità di fare ricerca; ciò nonostante, continuò ad apportare un importante contributo alla fisica con gli scienziati rimasti ad operare in Italia. Come già evidenziato, nel

⁸ Il testo completo del discorso di Eisenhower si trova in *Atoms for Peace: An Analysis After Thirty Years* (PILAT, J.F., PENDLEY, R.E., EBINGER, C.K., Eds), Westview Press, Boulder, CO (1985) Appendix C, pp. 283–291.

⁹ BECKMANN, R.L., *Nuclear Non-Proliferation, Congress and the Control of Peaceful Nuclear Activities*, p. 70.

dopoguerra gli Stati Uniti imposero, con l'*Atomic Energy Act*, un limite all'accesso da parte delle nazioni vinte all'industria nucleare; con gli accordi di pace del 1947, all'Italia fu impedito di avere a disposizione una industria per arricchire il combustibile nucleare, sia per usi militari che per usi pacifici. Con l'attivazione del piano Marshall¹⁰ la volontà era invece di indirizzare la produzione di energia elettrica ad una dipendenza dal petrolio statunitense. Scopo degli Stati Uniti era di ricostruire nel più breve tempo possibile un'Europa forte ma dipendente o almeno allineata all'Occidente, ed in grado di resistere alla "tentazione comunista". Soprattutto l'Italia era attenzionata per l'appeal e la forza che il partito comunista esercitava nella società, ma contraria ed avversa all'ideologia occidentale. L'Italia rischiava quindi di allearsi con l'Unione Sovietica, e questo non era strategicamente accettabile da parte degli USA, che voleva contenere l'espansione sovietica in Europa.

Nel 1957 venne anche istituita l'EURATOM, organizzazione internazionale di Stati Europei, con lo scopo di coordinare i programmi di ricerca sul nucleare e garantire che non fossero usati per fini bellici. In Italia, il primo reattore nucleare fu acceso nel 1960, per scopo di studio, al Politecnico di Milano, e rimase attivo fino al 1979. L'Italia, grazie alla conferenza di Ginevra e, successivamente, alla partecipazione alle organizzazioni internazionali, poté finalmente accedere al mercato comune della tecnologia e materiale necessario alla costruzione delle centrali nucleari.

Nel corso degli anni '60, l'Italia acquistò tre impianti di produzioni di energia elettrica di prima generazione: due di produzione statunitense e un'altra di produzione inglese.

La prima ad entrare in esercizio fu quella di Latina, il 12 maggio 1963, con la tecnologia Magnox¹¹ che il Regno Unito aveva sviluppato ed usato per tutte le proprie centrali, e venduto anche al Giappone ed appunto all'Italia. Al momento della sua attivazione, quella di Latina era la più potente in Europa con i suoi 210 MW. Successivamente furono costruite ed attivate prima la centrale del Garigliano

¹⁰ Ufficialmente chiamato "Piano per la ripresa europea", ideato dal segretario di stato George Marshall per la ricostruzione dell'Europa e della loro economia.

¹¹ Primo reattore nucleare di elevata potenza collegato ad una rete elettrica. Tale reattore poteva produrre materiale per armamenti.

di Sessa Aurunca (Caserta) nel 1964, con una tecnologia BWR¹² dell'americana General Electric Company, con altri 160 MW, poi la centrale Enrico Fermi di Trino (Vercelli) pochi mesi dopo, con altri 270 MW prodotti con tecnologia PWR¹³ statunitense della Westinghouse; al momento della sua attivazione, questa era la centrale nucleare più potente al mondo.

Nel 1966 l'Italia era la terza potenza nucleare al mondo per la produzione di energia, dopo gli Stati Uniti ed il Regno Unito, anche se l'energia elettrica prodotta era solo il 3-4% della produzione totale nel Paese. Nel 1970 si iniziò a costruire quella che divenne la quarta centrale nucleare in Italia: quella di Caorso (Piacenza), modello BWR4 di seconda generazione, con una produzione di 860 MW. Entrò in funzione nel 1978, collegata alla rete elettrica nel 1981 e spenta nel 1986 per la quarta ricarica di combustibile; gli avvenimenti di Chernobyl e del referendum del 1987 portarono allo spegnimento definitivo della centrale nel 1990 insieme alla centrale di Trino Vercellese, mentre quella di Sessa Aurunca fu fermata nel 1978 per manutenzione e poi venne definitivamente spenta nel 1982 per gli elevati costi della manutenzione e la scarsa vita ancora a disposizione per l'impianto. All'indomani del referendum nel 1987 anche la centrale di Latina venne fermata, ma venne mantenuta la sicurezza della struttura, dell'ambiente e della popolazione.

Inoltre, nel 1982 iniziò la costruzione di quella che doveva essere una centrale elettronucleare nel comune di Montalto di Castro, composta da due reattori di quasi un GW ciascuno, ma che non entrò mai in servizio a causa dei referendum che ci furono in Italia. Fu trasformata in una centrale termoelettrica a policombustibile, metano ed olio. Chiusa nel 1998, dal 2009 ospita un parco fotovoltaico da 6 MW, ed a breve le strutture ospiteranno il TECCC, Centro di Cultura e Conoscenza della Transizione Energetica, con museo ed aree espositive.

Altro fattore importante che ha determinato una spinta alla produzione di energia elettrica dal nucleare fu la crisi del petrolio nel 1973, dovuta alla guerra arabo-israeliana. La produzione di energia, in Italia e nel mondo, era prevalentemente dipendente dal greggio; i Paesi arabi, aderenti all'OPEC, cioè l'organizzazione dei Paesi produttori di petrolio, per punire i Paesi filoisraeliani diminuirono i volumi

¹² Boiled water reactor

¹³ Pressurized water reactor

dell'estrazione dai pozzi, e determinarono un aumento dei prezzi che causò un aumento del costo della vita, una frenata allo sviluppo industriale ed una vera e propria scarsità di materie prime derivate dal petrolio nel mercato mondiale. Molti Paesi, come la Francia, decisero che non sarebbero più rimasti strozzati in questo modo da Paesi stranieri, e si dotarono di una serie di centrali nucleari, arrivando a coprire nel tempo fino al 75% del loro fabbisogno. L'Italia iniziò questo percorso, ma poi scelse di sostituire le vecchie centrali a carbone ed olio combustibile, derivato dal petrolio, con il gas; gli eventi recenti hanno dimostrato che siamo passati quindi da una dipendenza ad un'altra, e non abbiamo ancora risolto concretamente il problema dell'autonomia energetica.

1.2 La Fissione nucleare

Uno dei principali metodi di generazione dell'energia nucleare è la fissione, cioè la separazione di un nucleo atomico pesante in due più leggeri, con conseguente

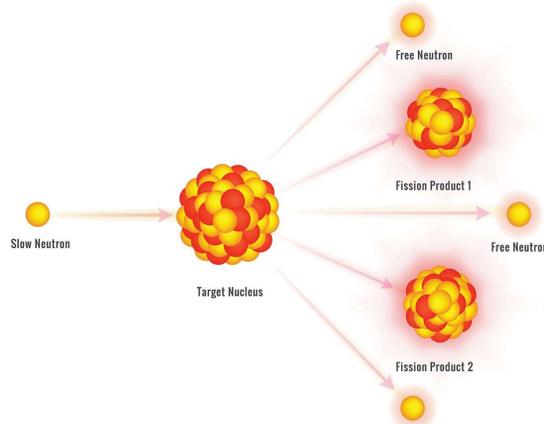


Figure 1: “La fissione nucleare” Fonte: Mondadori Education.

rilascio di energia, tanta energia. L'altra modalità è la fusione, per la quale necessita fondere tra loro elementi di massa atomica leggera (come il deuterio e il trizio) per ottenere il rilascio di energia. Ancora di più.

Mentre la fusione a idrogeno è stata usata, ed

è usata, per ordigni bellici (bombe H), ma per la produzione di energia elettrica siamo ancora in una fase di studio e sperimentazione, la fissione è la tecnologia in uso dalle prime centrali atomiche ad oggi, ed è stata nel tempo sempre migliorata, sia come efficienza che come sicurezza., Indicativamente, ad oggi con circa 6 grammi di uranio si genera la stessa energia di una tonnellata di carbone.

Ci sono diversi materiali che sono fissionabili, cioè se bombardati da neutroni si spaccano ed emettono energia, ma per essere idonei come combustibile nucleare,

devono essere in grado di sviluppare una reazione a catena, come l'uranio-235 ed il plutonio-239. L'uranio è un materiale naturale presente in tutto il mondo, mescolato alla terra o a rocce, in concentrazioni più o meno elevate ma in quantità superiore ad altri elementi come l'oro, l'argento, il mercurio e molti altri; si trova in maggior concentrazione in alcuni giacimenti nella quale è più conveniente estrarli ma è presente in forma più o meno diluita su tutta la crosta terrestre e anche nell'acqua del mare. Affinché sia conveniente estrarlo da una miniera deve essere con una concentrazione dallo 0,02% allo 0,05% nel materiale estratto. L'uranio si presenta naturalmente sotto forma di tre isotopi, U-238 al 99,28%, U-235 allo 0,71%, ed il restante U-234. Sono tutti fissionabili, ma solo l'isotopo U-235 è interessante perché fissile. Tale isotopo deve essere arricchito per essere usato per fini militari; quindi, separato dagli altri due fino a raggiungere un grado di purezza del 90%, ottenibile con diverse tecnologie, mentre per la produzione di energia elettrica può essere usato o al naturale oppure leggermente arricchito del 3-5%.

Nelle centrali nucleari, possono esserci più reattori. Il reattore è il sistema chiuso che genera energia e la trasforma. Ha al suo interno un recipiente in pressione (vessel) con il "combustibile", cioè l'uranio, che si presenta sotto forma di barre, cosiddetto nocciolo. Per iniziare la reazione a catena, l'uranio viene bombardato con neutroni lenti (come da scoperta di Fermi), che hanno maggiore efficienza nel colpire l'U-235 e non l'U-238; a questo punto inizia la reazione a catena, che quindi si auto-sostiene, si auto-alimenta. Necessita quindi controllare la fissione, tramite barre di controllo, cioè barre di materiale che assorbe i neutroni: quando vengono calate nel nocciolo, catturano neutroni e limitano le fissioni, controllando quindi la temperatura. Il calore viene trasferito dal nocciolo alla turbina tramite acqua (per questo motivo queste centrali vengono costruite vicino a corsi d'acqua o al mare), che ha anche un potere di cattura dei neutroni, per questo necessita arricchire l'uranio per bilanciare l'effetto. Altre centrali usano invece "l'acqua pesante", con formula chimica D₂O (due atomi di deuterio ed uno di ossigeno), meno neutroni-ricettiva, e quindi che consente di usare l'uranio al naturale.

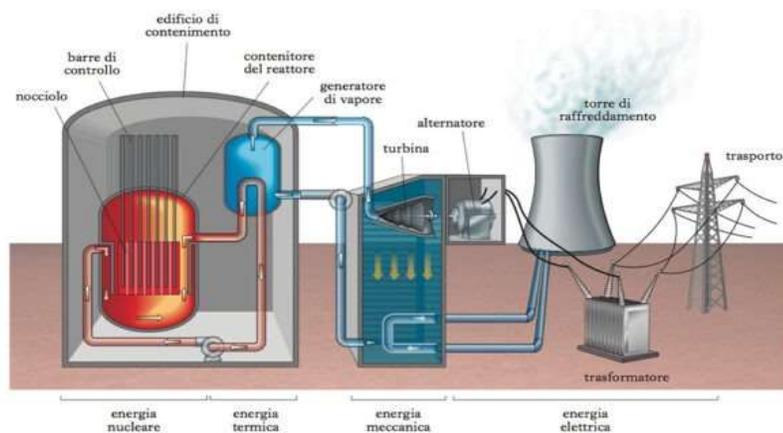


Figura 2: “Le centrali elettro-nucleari” fonte: educazione online.

L’edificio di contenimento, una spessa parete di cemento armato, serve ad evitare che succedano fughe di gas radioattivo, che potrebbero crearsi con la reazione chimica della fissione, o esposizione del nocciolo.

1.3 Metro di misura per eventi negativi: INES

Come ogni tecnologia creata dall’uomo, anche il nucleare, nonostante l’ingegneria di alto livello e lo studio che lo contraddistingue, ha avuto degli eventi e degli incidenti che hanno creato allarme o danni alle persone e all’ambiente, preoccupazione e diffidenza. Per mettere nella giusta dimensione gli incidenti che sono successi è stata creata una scala internazionale degli eventi nucleari e radiologici chiamata INES (*International Nuclear and radiological Event Scale*), utilizzata dal 1991. Questa scala divide gli eventi in otto livelli; non è di carattere scientifico ma esprime a livello di comunicazione al pubblico la gravità o meno di un evento. Tiene conto di tre criteri, cioè: le conseguenze sulle persone e sull’ambiente, l’impatto sulla struttura e il degrado della difesa in profondità dei sistemi di sicurezza. Mentre per i primi quattro livelli (da zero a tre) la classificazione è “*incident*”, quindi eventi potenzialmente dannosi, dal livello quattro al livello sette si parla di “*accident*” e quindi sono eventi che hanno un impatto più o meno importante sull’ambiente, sulle persone o sulla struttura.



*Figura 3:
"Ines, the
international
nuclear and
radiological
event scale"
Fonte: IAEA.*

Nel livello zero troviamo eventi di nessuna allerta, paragonabili a guasti risolvibili con una normale manutenzione di sistemi non vitali. Nel livello uno si classificano le anomalie che vengono gestite al di fuori della normale attività, e che quindi richiedono operazioni non standard.

Nel livello due si collocano gli eventi con una significativa contaminazione contenuta all'interno della struttura, mentre nel livello tre troviamo incidenti con alte esposizioni interne ma scarsa esposizione all'esterno, con conseguenze sulla salute degli addetti all'impianto.

Dal livello quattro troviamo gli incidenti più importanti con lieve esposizione della popolazione circostante, con danni significativi al reattore o alle barriere di contenimento, o morte di un operatore. Il livello cinque classifica un rilascio limitato di materiale radioattivo anche all'esterno dell'impianto, che richiede contromisure per salvaguardare la popolazione, dovuto ad un guasto o alla mancata custodia del materiale radioattivo.

Il penultimo livello, il sesto, racchiude gli incidenti gravi con dispersione nell'ambiente, nell'atmosfera di elevate quantità di materiale radioattivo che richiede azione protettive sulla popolazione limitrofa o comunque coinvolta all'esposizione.

L'ultimo livello, considerato catastrofico, considera una elevata quantità di radioattività emessa nell'atmosfera e nell'ambiente con danni alla popolazione misurabili e che necessitano di azioni di contenimento e protezione molto importanti.

GENERAL DESCRIPTION OF INES LEVELS			
INES Level	People and Environment	Radiological Barriers and Control	Defence-in-Depth
Major Accident Level 7	<ul style="list-style-type: none"> Major release of radioactive material with widespread health and environmental effects requiring implementation of planned and extended countermeasures. 		
Serious Accident Level 6	<ul style="list-style-type: none"> Significant release of radioactive material likely to require implementation of planned countermeasures. 		
Accident with Wider Consequences Level 5	<ul style="list-style-type: none"> Limited release of radioactive material likely to require implementation of some planned countermeasures. Several deaths from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Severe damage to reactor core. Release of large quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. This could arise from a major criticality accident or fire. 	
Accident with Local Consequences Level 4	<ul style="list-style-type: none"> Minor release of radioactive material unlikely to result in implementation of planned countermeasures other than local food controls. At least one death from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Fuel melt or damage to fuel resulting in more than 0.1% release of core inventory. Release of significant quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. 	
Serious Incident Level 3	<ul style="list-style-type: none"> Exposure in excess of ten times the statutory annual limit for workers. Non-lethal deterministic health effect (e.g., burns) from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Exposure rates of more than 1 Sv/h in an operating area. Severe contamination in an area not expected by design, with a low probability of significant public exposure. 	<ul style="list-style-type: none"> Near accident at a nuclear power plant with no safety provisions remaining. Lost or stolen highly radioactive sealed source. Misdelivered highly radioactive sealed source without adequate procedures in place to handle it.
Incident Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Exposure of a member of the public in excess of 10 mSv. Exposure of a worker in excess of the statutory annual limits. 	<ul style="list-style-type: none"> Radiation levels in an operating area of more than 50 mSv/h. Significant contamination within the facility into an area not expected by design. 	<ul style="list-style-type: none"> Significant failures in safety provisions but with no actual consequences. Found highly radioactive sealed orphan source, device or transport package with safety provisions intact. Inadequate packaging of a highly radioactive sealed source.
Anomaly Level 1			<ul style="list-style-type: none"> Overexposure of a member of the public in excess of statutory annual limits. Minor problems with safety components with significant defence-in-depth remaining. Low activity lost or stolen radioactive source, device or transport package.
NO SAFETY SIGNIFICANCE (Below Scale/Level 0)			

Figura 4: “INES: The international nuclear and radiological event scale”. Fonte: IAEA

INES, classifica gli incidenti e gli inconvenienti nucleari e radiologici considerando tre aree di impatto: “Persone e Ambiente”, dove vengono considerate le dosi di radiazioni alle persone vicine al luogo dell’evento, e il rilascio diffuso e non pianificato di materiale radioattivo da un impianto.

“Barriere e Controllo radiologico”, vengono considerati gli eventi senza alcun impatto diretto sulle persone o sull’ambiente, e si applica solo all’interno delle

principali strutture. Copre alti livelli di radiazione non pianificati e la diffusione di quantità non significative di materiali radioattivi confinati all'interno dell'impianto. Ed infine, "Difesa in profondità", include eventi senza alcun impatto diretto sulle persone o sull'ambiente, ma per i quali la gamma di misure messe in atto per prevenire gli incidenti non ha funzionato come previsto.

Le note dolenti

Gli incidenti di basso o medio livello, che vanno dalla rottura di una valvola di un sistema di raffreddamento (centrale di Krsko nel 2008), al livello 3 raggiunto nel 2005 nell'impianto di Sellafield, in Inghilterra, con dispersione di materiale radioattivo all'interno della struttura di contenimento, a centrale già chiusa ed in fase di messa in sicurezza per lo smantellamento, ma con livelli di radioattività tali che richiederanno tempi di "decommissioning", cioè di smaltimento totale dell'impianto, nell'ordine del centinaio d'anni.

Al livello 4 si collocano storicamente, dall'inizio dell'era nucleare ad oggi, 9 incidenti con forte esposizione alle radiazioni degli operai; un caso su tutti, quello successo in Giappone, a Tokaimura, dove in un impianto di riprocessamento di uranio esaurito, tre operai introdussero nel macchinario più di cinque volte il quantitativo di materiale consentito, e si esposero al conseguente lampo di raggi gamma: due morirono, un altro si salvò. Furono evacuate per sicurezza 161 persone, ed alla popolazione limitrofa fu chiesto di non uscire per un giorno. Non ci fu una contaminazione ambientale significativa.

Uno dei più famosi incidenti nucleari, il primo in territorio USA, ed il primo al mondo di un certo livello (classificato poi con un livello 5), fu quello successo all'impianto di Three Mile Island, in Pennsylvania, sul fiume Susquehanna. Successo pochi giorni dopo l'uscita nei cinema del film "Sindrome Cinese", che raccontava un incidente ad una centrale nucleare, dove il nocciolo aveva rischiato la fusione (*meltdown*) che, nell'immaginario, riusciva a perforare il pavimento di contenimento ed il suolo, fino a passare il centro della terra e sbucare dall'altra parte del pianeta (tanto per dare l'idea che nulla potesse fermarla). Nel caso reale, la centrale statunitense, composta dai due reattori TMI-1 e TMI-2 era a tecnologia BWR (*Boiled Water Reactor*), quindi il nocciolo era raffreddato a vapore acqueo

pressurizzato; una serie di sfortunati eventi, a partire dal malfunzionamento di uno dei sistemi di raffreddamento, che portò un reattore ad una elevata pressione, risolta con l'apertura di una valvola di sicurezza, che si doveva chiudere al termine dello sfogo, ma rimase invece aperta. Alcuni sistemi di monitoraggio però segnalavano agli operatori che fosse chiusa, ed anche altri sistemi non facevano capire agli operatori che si stava verificando lo sversamento del liquido refrigerante, causando quindi lo scarico a fiume di circa 200 metri cubi di acqua leggermente radioattiva. Fino a questo punto l'incidente era considerato di lieve entità; l'imperizia degli operatori, scarsamente preparati, tra i quali non vi era nessun ingegnere nucleare, causò la fusione del nocciolo. TMI-2 fu chiusa, senza particolari ulteriori conseguenze; TMI-1 invece, dopo un periodo di sistemazione ed aggiornamento tecnologico, fu riattivata ed ha funzionato fino al 2019: entrambe sono ora in fase di decommissioning. I report ufficiali¹⁴ certificano che solo alcuni operatori furono esposti a radiazioni poco sopra ai limiti di sicurezza, nessuno con gravi conseguenze, mentre la popolazione limitrofa fu esposta ad una radiazione poco sopra quella di fondo, cioè la naturale, un sesto di quella che si assorbirebbe con una singola radiografia. Da questo incidente la USNRC, l'ente che gestisce, regola e controlla l'esercizio delle centrali nucleari negli Stati Uniti, implementò tutta una serie di nuovi regolamenti, obblighi di formazione del personale, certificazioni dei materiali di costruzione, degli impianti e dei sistemi di sicurezza oltre alla pianificazione di continue ispezioni e verifiche¹⁵.

Al livello 6, risulta classificato dalla IAEA un singolo incidente, avvenuto in ambito militare, di cui siamo venuti a conoscenza molti anni dopo l'evento. 1957, Unione Sovietica, Guerra Fredda in corso: nel sito di processamento di materiale nucleare per produzione di bombe atomiche, nella regione rurale orientale della Russia Čeljabinsk, il sistema di raffreddamento di una delle cisterne, contenente tra le 70 e le 80 tonnellate di materiale radioattivo allo stato liquido, si guastò, e nessuno se

¹⁴ J.G. Kemeny, *Report of the President's Commission on the accident at Three Mile Island*, U. S. Government Printing Office, Washington, 1979.
United States Nuclear Regulatory Commission, *Three Miles Island Accident*, Backgrounder Office of Public Affairs, April 2022.

¹⁵ United States Nuclear Regulatory Commission, *Three Miles Island Accident*, Backgrounder Office of Public Affairs, April 2022.

ne accorse fino all'esplosione chimica che ne conseguì, paragonabile a un centinaio di tonnellate di TNT¹⁶. In un'area di più di 20.000 km² la più colpita fu Kyštym, contaminata da una nube di polveri ed elementi altamente radioattivi; solo una piccola parte della popolazione fu evacuata, quella di etnia russa, mentre quella locale di origine tartara fu lasciata sul posto ed esposta senza alcuna protezione e informazione su cosa fosse successo. Si presume che fosse stato fatto di proposito poiché furono mantenuti sotto controllo medico per monitorare i numerosi casi di tumori e malattie, e le mutazioni genetiche che presentavano il 90% delle nuove generazioni: solo il 7% si poteva considerare sano. Dell'incidente si venne a sapere solo nel 1976, grazie al fisico russo Zhores Medvedev, e solo nel 1990 i documenti sono stati desecretati; inoltre, fino al 1992 nessun straniero poteva recarsi nella regione, ed ancora oggi alcune aree risultano altamente contaminate.

A livello 7, cioè incidente catastrofico, troviamo ancora l'ex Unione Sovietica, con il più famigerato degli incidenti, che non riuscirono a mascherare: quello di Chernobyl (Černobyl'), a circa 100 km da Kiev, in Ucraina. Nel 1985 l'economia dell'Unione Sovietica era in piena stagnazione, e stentava a tenere il ritmo dell'avversario statunitense in merito allo sviluppo tecnologico e al modello di società. Il nuovo segretario generale del Partito Comunista dell'Unione Sovietica, Michail Gorbačëv, decise di intraprendere un percorso di rinnovamento, di apertura al mondo, di slancio economico. Il termine "*perestrojka*", ricostruzione, ed anche "*glasnost*" (trasparenza) diventano conosciuti anche nel resto del mondo, ancora diviso tra blocco occidentale ed orientale, tra consumismo e socialismo, tra democrazia e dittatura, con la guerra fredda ancora in essere e la "cortina di ferro" a dividere le Nazioni. Questo cambio di passo richiedeva una forte spinta interna al cambiamento e all'industrializzazione, per la quale l'energia elettrica era fondamentale. Per raggiungere gli obiettivi prefissi le centrali avevano un ruolo importante: i reattori nucleari, del modello RBMK¹⁷, nati per arricchire l'uranio per usi bellici, e quindi coperti da segreto militare, furono in parte convertiti ed utilizzati anche per la produzione di energia elettrica per uso civile. I reattori con tecnologia

¹⁶ Trinitrotoluene (uno dei più conosciuti esplosivi preso ad esempio per quantificare la grandezza di una esplosione).

¹⁷ Reaktor Bol'soj Moščnosti Kanal'nyj, che significa letteralmente reattore di grande potenza a canali.

RBMK-1000 sono particolarmente instabili e difficili da tenere sotto controllo a causa di alcuni difetti progettuali: per impedire l'accumulo di un isotopo derivato dal bombardamento dell'uranio, il combustibile veniva cambiato dopo pochi giorni e quindi era necessario operare con una gru per calare le nuove barre di fissile dall'alto. Per agevolare questa operazione Chernobyl non aveva una vera e propria struttura di contenimento adeguata, ma un tetto apribile. All'interno del *vessel* in determinate condizioni si creavano dei gas che falsavano la lettura delle strumentazioni, portando facilmente gli operatori della sala di controllo a non comprendere lo stato del reattore. Gli operatori inoltre non avevano una specifica formazione ed esperienza in ambito di reattori nucleari, molti venivano da altre tipologie di impianto, come quelli a carbone.

La notte del 26 Aprile del 1986, alle 01:23 ora locale, il vice capo ingegnere Djatlov volle fare il test sulla sicurezza del sistema di raffreddamento, che non era ancora stato passato e che avrebbe dovuto essere fatto il giorno prima durante un turno con operatori formati sull'attività da eseguire; esigenze di servizio hanno portato a spostare il test alla notte, con un turno nuovo di personale non briffato, e che aveva a che fare con un reattore che non aveva lavorato in modo lineare durante il giorno ed aveva accumulato una serie di criticità, di accumulo di gas esplosivi e di aumenti repentini di potenza che non riuscirono a controllare a causa della strumentazione e dell'inesperienza. Djatlov si impose con la sua autorevolezza sui suoi sottoposti, contrari a rimuovere tutte le sicurezze manualmente e ad eseguire il test in quelle condizioni. Per aumentare quindi la potenza rimossero quasi tutte le barre di controllo (il minimo era 15 barre, ne lasciarono solo 6), rimossero tutti gli allarmi e i dispositivi di sicurezza ed iniziarono il test, portando dentro il reattore una condizione tale da generare due esplosioni chimiche dei gas che si erano formati, che scoperchiarono il tetto del reattore. A contatto con l'aria e con le alte temperature sviluppatasi, si innescò un incendio che sparse nell'atmosfera elevate quantità di radiazioni sotto forma di nube radioattiva e detriti. L'incendio durò diversi giorni, e la nube creatasi fu portata dal vento verso ampie zone dell'Ucraina, della Federazione Russa e della Bielorussia, e marginalmente anche verso alcuni paesi del nord Europa. I primi ad accorgersi furono gli svedesi che rilevarono uno strano aumento di radioattività nell'aria e che precipitò al suolo con la pioggia; dopo

alcune verifiche interne capirono che qualcosa di grave era accaduto in Unione Sovietica. Ma solo dopo molte insistenze, le autorità sovietiche comunicarono le prime notizie relativi all'incidente, minimizzando l'accaduto anche verso la propria popolazione. Prypjat', cittadina modello sorta a 2 km fu evacuata solo dopo un paio di giorni, e nei mesi successivi altre 130.000 persone, residenti in un'area di più di 200.000 km², furono evacuate e spostate in altre zone del territorio, in quanto tutta l'area fu dichiarata contaminata.

A vent'anni dall'incidente, l'ONU ha promosso il Chernobyl Forum¹⁸ a Vienna, dal 2003 al 2005, alla quale hanno partecipato le più importanti organizzazioni mondiali relative alla sanità, all'economia e all'ambiente: *International Atomic Energy Agency (IAEA)*, *Food and Agriculture Organization (FAO)*, *United Nations Development Program (UNDP)*, *United Nations Environment Program (UNEP)*, *United Nations Office for the Coordination of Human Affairs (UNOCHA)*, *United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR)*, *World Health Organization (WHO)* e *World Bank*, e le autorità competenti di Ucraina, Bielorussia e Federazione Russa¹⁹ (Rapporto di Chernobyl Forum, 2006). I risultati degli studi hanno evidenziato che una cinquantina di addetti sono morti subito per le esplosioni, o nei giorni successivi, per le radiazioni assorbite durante la fase dello spegnimento dell'incendio, durato circa 15 giorni; su un totale di mille persone altamente esposte alle radiazioni perché intervenute immediatamente all'incidente, le 600.000 persone impiegate nelle operazione successive di bonifica e contingenza del problema, e i 5.000.000 di persone coinvolte dalla ricaduta della nube radioattiva, poco più di 4.000 persone hanno avuto casi di tumore alla tiroide riconducibili all'esposizione alle radiazioni dovute all'incidente, probabilmente altrettante ce ne saranno nei prossimi decenni, e di queste oltre il 95% sono trattabili con le appropriate cure; per le altre persone, non

¹⁸ IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR, WORLD BANK GROUP “*Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine*” The Chernobyl Forum: 2003-2005 second revised version.

¹⁹ Paola Batistoni “*Il rapporto del Chernobyl Forum*” ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare, s.d.

ci sono evidenze di malattia, confrontando i dati con le statistiche di mortalità di popolazione mondiale non esposta. Molto importanti gli studi condotti tra gli esodati, che dimostravano spesso depressione ed apatia, oltre ad un malessere continuo causato dalla scarsa fiducia nelle istituzioni e nelle informazioni ricevute. Allo scopo di fornire la migliore assistenza medica alla popolazione, nei territori dove la nube radioattiva ha inciso di più sono stati costruiti ospedali e centri medici, oltre ad altre strutture per lo sport ed il tempo libero. Soprattutto si è dimostrato importante gestire le informazioni con trasparenza, in modo da evitare l'ansia indotta dall'assenza di conoscenza degli eventi, e degli esiti concreti e misurabili tra le persone ed il territorio.

A livello psicologico-sociale l'incidente ha avuto un notevole impatto, sia tra le popolazioni colpite, in modo sicuramente più severo, sia nel resto della popolazione mondiale, causando in alcuni Paesi, come in Italia, la fine del programma nucleare. Ad oggi l'"area di alienazione", cioè, interdetta agli insediamenti umani, ha un raggio di 30 km dalla centrale, nella quale fino a prima della guerra era possibile per i turisti fare gite di una giornata, mentre degli studiosi potevano fare delle permanenze a turni di pochi giorni o al massimo un mese. La flora e la fauna della zona sono state duramente colpite con l'incidente, causando la morte di foreste ed animali, ma già dopo qualche stagione, complice l'assenza della presenza umana, la natura ha ripreso il possesso del territorio. La città di Pryp'jat' è ora completamente invasa dagli alberi, e fiorente è la fauna.

Ben altra cosa fu invece l'incidente di Fukushima Dai-ichi nel 2011, anche se comunque valutato del 7° grado della scala INES a causa dell'emissione nell'atmosfera di importanti quantità di particelle radioattive. La causa dell'incidente in questo caso è da attribuire ad un sisma di estrema potenza, nono grado di magnitudo su scala Richter con epicentro nell'Oceano Pacifico a circa 130 km dalla costa del *Great East Japan*, e denominato terremoto di *Tōhoku*.

Già dalle prime scosse, le 11 centrali nucleari presenti nelle zone colpite hanno attivato il meccanismo automatico di spegnimento dei reattori, tramite l'inserimento di tutte le barre di controllo; all'arrivo dello tsunami le pompe stavano raffreddando i noccioli ancora incandescenti. La centrale di Fukushima Dai-ichi è protetta contro eventuali tsunami con un muro alto 9 metri dal livello medio del

mare; l'onda che la colpì era alta dai 12 ai 14 metri, scavalcando il muro ed allagando le stanze con i generatori Diesel che alimentavano tutto il sistema, comprese le pompe di raffreddamento. Poche ore dopo, in tre dei sei reattori, l'accumulo di gas che si era generato, in parte mitigato da una fuoriuscita controllata ed autorizzata, ha creato una serie di esplosioni nelle unità 1, 2 e 3, con conseguente *meltdown* del nocciolo e distruzione parziale della copertura, e successiva dispersione nell'aria di gas e vapori contaminati. Un'area di 20 km di raggio fu evacuata ma non si sono registrate vittime o feriti nell'immediato, né successivamente, a causa delle radiazioni dell'incidente nucleare (IAEA, 2011)²⁰, mentre per quanto riguarda le vittime causate dal terremoto e dallo tsunami i report ufficiali dell'IAEA parlano di circa 20.000 tra morti accertati e dispersi.

1.4 La pubblica percezione e l'effetto NIMBY

I dati riportati in questa tesi per descrivere gli incidenti nucleari successi, derivano dai report ufficiali degli enti nazionali ed internazionali che se ne sono occupati, forti dei dati forniti da centinaia di scienziati ed esperti nei vari settori interessati della salute, dell'ambiente e dell'economia.

Il grande pubblico però spesso accede alle informazioni di qualsiasi genere in modo sintetico, o comunque filtrato, ed anche quanto riguarda l'energia nucleare ha subito lo stesso meccanismo. L'atavica paura dell'uomo verso l'ignoto, spronata a volte da narrazioni fuorvianti o volutamente tendenziose, hanno condizionato l'opinione pubblica per tutto quello che concerne i sistemi di produzione di energia.

A volte, probabilmente con l'intento di voler colpire l'attenzione del pubblico, o magari vendere una copia in più, vengono fornite dai media notizie in modo perlomeno fuorviante:

²⁰ IAEA (International Atomic Energy Agency). «*Mission Report the great east Japan earthquake expert mission IAEA international fact-finding expert mission of the Fukushima Dai-ichi NPP accident following the great east Japan earthquake and tsunami Tokyo, Fukushima Daiichi NPP, Fukushima Dai-ni NPP and Tokai Dai-ni NPP, Japan*», 2 May-2 June 2011

La corsa dell'uranio è appena iniziata, la Cina si fionda sul nucleare per raggiungere il net zero



Figure 5: Fonte: Finanza Online, 17 maggio 2023

L'associazione di una notizia riguardo l'accesso di una Nazione alla materia prima necessaria per produrre energia elettrica con il fungo atomico è quantomeno bizzarra, ma se ne intuisce lo scopo: un click in più dal cellulare.

La comunicazione è fondamentale in tutti i settori, e deve prevedere competenza, autorevolezza, onestà e trasparenza.

Volare in aeroplano è una cosa innaturale, ed anche solcare gli oceani richiede sicuramente una grande dose di coraggio, o una forte esigenza o necessità. Diventa naturale quando si è consapevoli che il mezzo usato è all'avanguardia nella sicurezza, che c'è tutto un sistema di controllo che supervisiona tutto il traffico, evita gli incidenti, soccorre e mitiga i danni di incidenti nel remoto caso succedano. Viaggiare in aereo, ad esempio, è ben diverso ora che 80 anni fa, ogni singolo particolare costruttivo segue una prassi dalla progettazione, agli stress test, alle verifiche ispettive, alla documentazione, alla formazione del personale che se ne occupa.

Allo stesso modo, oggi il settore dell'energia dal nucleare è uno tra i più regolamentati in tutte le fasi di vita: dalla progettazione, alla costruzione, alla vita operativa fino ad arrivare al decommissioning, all'estrazione e trattamento del combustibile, ed allo smaltimento dei rifiuti radioattivi. Fin dal dopoguerra, quasi tutti gli Stati hanno collaborato in una rete di condivisione degli studi, delle competenze e delle esperienze, creando un circolo virtuoso che ha portato alla costruzione di centrali sempre più performanti dal punto di vista di rendita energetica, ma soprattutto sicure in quanto gli eventi naturali, come pure gli errori umani, sono mitigati dalla tecnologia costruttiva, da elettronica ed informatica sempre più evoluta, e da procedure e formazione del personale approfondite. Uno dei problemi più grossi che il nucleare ha dovuto affrontare, e che tutt'ora affronta, è quello della comunicazione: ad esempio, negli Stati Uniti si sono progettate 223 centrali nucleari, ma solo il 57% è attualmente in produzione; molte sono state

bloccate a costruzione già avviata, con perdite economiche di miliardi di dollari, spesso a causa delle proteste della popolazione e delle associazioni ambientali²¹. Secondo il prof. Wüstenhagen²² per arrivare ad una accettazione, tanto per una centrale nucleare quanto per lo stoccaggio delle scorie radioattive o per un termovalorizzatore, la comunicazione deve lavorare su tre livelli: il primo, quello sociopolitico, in modo da iniziare un dialogo e suscitare l'interesse ad informarsi. Il secondo livello, della comunità locale, con la quale confrontarsi in modo paritetico, fornendo informazioni tecniche in piena trasparenza, ed acquisendo informazioni sul territorio ed eventuali desiderata (accogliere le obiezioni e proporre alternative sempre mantenendo il pubblico partecipe nella scelta informata); si tratta di gestire il cosiddetto effetto NIMBY (*Not In My Back Yard*)²³, ovvero la contestazione della realizzazione di un'opera di interesse pubblico nelle proprie vicinanze per interesse personale, ma non essere contrario come linea di principio se fatto da un'altra parte. L'obiettivo è passare dall'effetto NIMBY all'effetto PIMBY (*Please in my back yard*)²⁴ mettendo in luce il guadagno e/o la contropartita che se ne otterrebbe (bollette meno care, teleriscaldamento a basso costo, opportunità di impiego...). Infine, far accettare al mercato economico questa implementazione tecnologica, che deve essere voluta e non osteggiata sia dai consumatori che dagli investitori.

Come evidenziato dallo storico degli incidenti (in Unione Sovietica, ma non solo), la mancanza di trasparenza e reticenza nel fornire informazioni sono tra le prime cause di perdita di fiducia nei confronti degli operatori del settore nucleare. La questione è stata posta come obbligo di legge da EURATOM nel 2009: *“Information to the public. Member States shall ensure that information in relation to the regulation of nuclear safety is made available to the workers and the general public. This obligation includes ensuring that the competent regulatory authority*

²¹ G. Bucetirisp, S. Del Bufalo, L. Moretti, D. Fioravante, E. Pasta, *L'accettazione sociale del nucleare*, Enea Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo economico sostenibili, settembre 2010.

²² Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink, Mary Jean Bürer, *Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept*, Energy Policy Volume 35, Issue 5, May 2007, Pages 2683- 2691

²³ Traduzione: “non nel mio cortile”

²⁴ Traduzione: “per favore nel mio cortile”

*informs the public in the fields of its competence” (2009/71/EURATOM
“Community framework for the nuclear safety of nuclear installations, Article 8)²⁵.*

E la fiducia è la base da dove obbligatoriamente partire.

In generale, si evince che una maggiore informazione e discussione aumenta esponenzialmente l'accettazione da parte della cittadinanza. E non si deve solo parlare di nucleare, ma confrontare le tecnologie disponibili per accontentare le richieste energetiche e trovare insieme, istituzioni, associazioni di categoria e cittadini, la soluzione più performante. Ad esempio, la Norvegia copre tutto il proprio fabbisogno esclusivamente con le centrali idroelettriche, grazie alla conformazione del proprio territorio ricco di salti d'acqua, ed alla limitata popolazione (circa 5,5 milioni). La Francia invece, dopo la crisi petrolifera del 1973, in pochi anni ha creato una rete di impianti nucleari, che tutt'oggi copre il 75% delle necessità.

²⁵ Enea Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'Energia e lo sviluppo economico sostenibili, *L'accettazione sociale del nucleare*, G. Buceti, S. Del Bufalo, L. Moretti, D. Fioravante, E. Pasta, settembre 2010

CAPITOLO II

COSA SERVE SAPERE

2.1 Tecnologia e design

Il principio di funzionamento della fissione è comune a tutti i tipi di reattori nucleari esistenti, come pure lo sfruttamento dell'energia termica da essi prodotta, trasformata da scambiatori di calore in energia meccanica tramite l'azionamento di turbine a vapore, e tramite queste in energia elettrica, che è più facilmente distribuibile tramite la rete di cavi ed utilizzabile dall'utente finale. Ma diverse sono le soluzioni trovate per arrivare allo stesso risultato; le centrali si differenziano per la velocità dei neutroni, per il tipo di combustibile, per il fluido refrigerante e per il tipo di moderatore, cioè quel materiale che rallenta e cattura i neutroni, favorendo quindi le fissioni: queste sono le differenze tecnologiche prevalenti ad oggi. Inoltre, le centrali nucleari vengono classificate anche per i meccanismi di sicurezza che adottano, che possono essere di tipo attivo o passivo. Tutte le centrali nucleari distribuite nel mondo, circa 440, sono a fissione e a neutroni moderati, hanno al loro interno più reattori e adottano “*design*” diversi, cioè soluzioni diverse che portano a risultati di efficienza o di sicurezza diverse, studiate e costruite da diverse aziende che operano nel settore, e che vendono poi i loro progetti alle Nazioni interessate, sempre sotto il controllo dell'IAEA. Il loro numero è in continuo mutamento, a causa della dismissione di vecchie centrali, attivazione di nuove, o spegnimento voluto per motivi politici o economici. In base ai parametri precedentemente descritti, le centrali nucleari vengono classificate in “generazioni”: ad oggi siamo arrivati alla GEN III+ (avanzata), anche se la maggior parte di quelle attive oggi sono di GEN II o GEN II+, con una vita operativa aumentata da upgrade tecnologici.

L'accensione di un reattore prevede di innescare la cosiddetta “reazione a catena”, tramite un bombardamento iniziale del combustibile con neutroni rallentati, fino al raggiungimento della cosiddetta “criticità”, che a dispetto del nome fuorviante è proprio la condizione di funzionamento normale ed autosostenuto del reattore, con

L'emissione, da parte dell'atomo colpito da un neutrone, di altri neutroni che a loro volta colpiscono altri atomi. Questa viene quindi mantenuta al livello voluto tramite il "moderatore", che rallenta la velocità ed il numero dei neutroni, mentre compito del "refrigerante" è trasferire il calore prodotto dalla fissione alle turbine che lo trasformano in energia elettrica; la temperatura normale di esercizio è intorno ai 300-400°C, e va tenuto tutto sotto controllo per evitare il cosiddetto "meltdown nucleare", cioè il danneggiamento del nocciolo per temperature troppo elevate, con possibile danneggiamento dei contenitori di protezione. Tutto il reattore è inserito in una capsula in pressione chiamata "vessel", e tutto il sistema è all'interno di un contenitore fatto di spesse mura di cemento armato (2,5 metri), per contenere eventuali fughe di radioattività e resistere anche all'impatto con un aereo di linea.

Altro parametro di classificazione è il livello di sicurezza che i reattori implementano: di tipo attivo, quando sotto il controllo dei tecnici, ma anche di tipo passivo, cioè con sistemi che intervengono in autonomia grazie a leggi fisiche. Sono identificate quattro generazioni di reattori: nella prima vengono inserite i primi tipi di reattori atomici, a partire dalla *Chicago Pile 1* di Enrico Fermi, il primo in assoluto, che, come sistema di sicurezza estremo, disponeva di un uomo che con un'ascia doveva tagliare una fune per fare cadere delle barre di cadmio all'interno del combustibile per bloccarne la reazione a catena, chiamato "safety control rod axe man – SCRAM". Il sistema di sicurezza principale presente in tutte le centrali nucleari, in pratica un pulsante rosso che va a spegnere immediatamente il reattore in caso di emergenza o nel caso i parametri di controllo vadano fuori scala, ancora oggi mantiene lo stesso nome; può anche essere come sistema passivo quando le barre di controllo, in assenza di energia elettrica, scendono per gravità all'interno del nocciolo provocandone lo spegnimento. I primi reattori commerciali, cioè collegati alla rete elettrica, sono stati accesi tra gli anni 50 e 60 del secolo scorso, ma erano poco efficienti: ad esempio, i reattori Magnox di produzione UK andavano da poche decine a poche centinaia di MW, usavano uranio al naturale (non arricchito) e raffreddato ad anidride carbonica. Altri modelli di altri costruttori erano raffreddati a vapore acqueo oppure a sodio fuso.

A partire dalla seconda metà degli anni '60 sono state costruite centrali di seconda generazione, in grado di ottenere maggior efficienza e potenza generabile, ma anche

maggior sicurezza di esercizio. Le tecnologie più usate sono state la PWR (*Pressurized Water Reactor – Reattore ad Acqua Pressurizzata*) e la BWR (*Boiled Water Reactor – Reattore ad Acqua Bollente*): in entrambe l'acqua funge da raffreddamento, ma nei PWR viene mantenuta liquida grazie all'alta pressione del circuito, e scambia il calore con un circuito secondario che genera il vapore per le turbine, mentre nei BWR l'acqua sotto forma di vapore raffredda e fa girare le turbine senza intermediari; quest'ultimo sistema è considerato però più difficile da gestire, anche se più economico. Il Canada ha sviluppato la tecnologia CANDU²⁶, con moderazione e raffreddamento ad acqua pesante, che consente l'uso di uranio non arricchito; invece l'Unione Sovietica ha costruito con tecnologia RBMK, molto efficienti ed economici perché in grado di usare uranio al naturale come i CANDU ed anche di produrre materiale per uso militare, ma molto instabili ed insicuri a causa delle frequenti procedure di sostituzione delle barre di combustibile e dell'assenza di strutture di contenimento idonee, come l'incidente di Chernobyl ha dimostrato.

Successivamente al 1987 e fino ai primi anni 2000 le società di costruzione di centrali nucleari hanno concentrato i loro sforzi su una maggior efficienza e sull'implementazione di meccanismi di sicurezza, soprattutto meccanismi di tipo passivo, cioè in grado di attivarsi da soli senza bisogno di un operatore, nel momento in cui si perda il controllo del reattore: queste sono considerate di terza generazione. L'IAEA ha introdotto nel 1994 due concetti fondamentali da perseguire: *nuclear security* e *nuclear safety*. Nel primo caso l'obiettivo è la gestione in sicurezza del materiale radioattivo, evitando furti o compravendite illegali, cioè non autorizzate, tenendo quindi traccia di tutto il materiale radioattivo distribuito nel mondo; nel secondo concetto si tratta di perseguire la massima sicurezza possibile per i lavoratori e la popolazione, prevenendo gli incidenti e le fughe radioattive. Tutti i sistemi attivi e passivi sono inoltre ridondati, così se il primo ad intervenire non funziona, ne subentra un altro, come una sorta di “cipolla di sicurezza”. Ad esempio, attualmente i sistemi di raffreddamento sono quattro, indipendenti l'uno dall'altro, ed in grado ciascuno di raffreddare il nocciolo dopo

²⁶ CANadian Deuterium Uranium

lo spegnimento. Gli aspetti negativi in questo tipo di centrali sono però il costo ed i tempi di costruzione. I tempi lunghi sono dovuti prevalentemente alle stringenti normative degli enti di controllo, con le continue verifiche ispettive e successive autorizzazioni per ogni singolo componente della centrale; inoltre, tutta la filiera industriale necessaria per produrre la tecnologia necessaria deve essere performante. I costi dipendono molto da progetti, componenti, dalla preparazione del personale impiegato, ma anche dal fatto che, allungandosi i tempi di realizzazione, anche i tempi di rientro del capitale diventano lontani e a volte incerti, a causa del possibile cambiamento di umore delle forze politiche e della popolazione. Le centrali di terza generazione però sono caratterizzate da una vita operativa media molto lunga, nell'ordine dei 60-80 anni, contro i circa 40-60 delle centrali di seconda generazione.

La ricerca nel frattempo non si è fermata, e nel 2001 il Dipartimento per l'Energia degli Stati Uniti ha avviato il "GIF - *Generation IV International Forum*", uno studio internazionale sui possibili sistemi di quarta generazione; su oltre cento soluzioni, ne sono state selezionate sei, in grado di rispondere alle esigenze moderne di sostenibilità ambientale ed economica, affidabilità, sicurezza, e mantenimento del controllo per evitare uso militare o terroristico: i sistemi di sicurezza, non bypassabili, fanno in modo che il reattore non superi mai soglie di sicurezza anche volendo innescare un incidente nucleare.

La quarta generazione introduce, oltre ad altre nuove tecnologie di funzionamento del reattore, anche il concetto di flessibilità per gestire esigenze diverse, sia nella produzione di energia elettrica che soluzioni complementari. La ricerca si è orientata verso diversi ambiti, come i reattori ad altissima temperatura, cioè i cosiddetti "reattori veloci", che non moderano la velocità dei neutroni, ed il calore d'uscita del liquido refrigerante può essere usato per desalinizzare l'acqua in luoghi dove scarseggia, o per il teleriscaldamento, oppure per produrre idrogeno tramite termo-elettrolisi: le applicazioni sono molteplici. L'idrogeno prodotto poi può essere immagazzinato in pressione, trasportato o trasferito, ed usato per produrre ulteriore energia elettrica tramite celle a combustibile. La tendenza è quindi di eliminare l'acqua come refrigerante, ma usare metalli liquidi, come il piombo liquido o il sodio, che consentono di lavorare a temperature molto elevate, ed anche

a riutilizzare i rifiuti radioattivi da produzione di energia, oppure usare altri combustibili, come il torio²⁷. Questi reattori sono rivoluzionari rispetto alla III Gen, poiché riescono ad utilizzare la totalità dell'uranio naturale, e non solo il circa 0,71% dell'isotopo U-235, ed anche i rifiuti delle vecchie centrali: questo vuol dire meno rifiuti, e quelli che rimangono, con una rapida decadenza della radioattività; inoltre hanno una maggior efficienza grazie anche al processo chiamato “*fast-breeder*”, auto-fertilizzante, in grado di produrre altro materiale fissile tramite trasformazione chimica durante il funzionamento.

Esistono già dei prototipi: due funzionanti, ad esempio, risultano attivi in Cina nella centrale di Shidao Bay, reattori raffreddati ad elio identificati con dall'acronimo HTGR²⁸ che raggiungono temperature di 750 °C e possono produrre anche idrogeno e teleriscaldamento. La commercializzazione e quindi l'utilizzo dei reattori GEN IV si attende per il prossimo decennio.



Figura 6: Primo piano su una palla TRISO che dettaglia il nucleo (in giallo) e i 3 strati protettivi. Fonte: *Meta-Défense.fr*

Anche il combustibile si sta rivoluzionando: invece dei pellet di uranio, si stanno studiando delle sfere di ceramica multistrato contenente Ossi-Carburo di Uranio (UCO), e chiamato TRISO, che sta per *TRi-structural ISOtropic Particle fuel*. Il combustibile in questa forma resiste a temperature altissime, ben oltre gli scenari peggiori che si potrebbero avere in caso di incidente nucleare, rendendolo più sicuro.

Altra novità sono i piccoli e medi reattori modulari (SMR - *Small Modular Reactor*), non tanto come concezione, in quanto già usati come propulsori navali militari, ma anche civili in alcune rompighiaccio in servizio nell'Artico, quanto al concept di produzione su scala industriale, con assemblaggio sul posto, o addirittura trasportabili, ed avranno una potenza a partire da 10 MW fino ai 300 MW, contro i 1600 MW di un reattore di GEN III avanzata. Questo vuol dire una importante riduzione dei costi, una

²⁷ Il nome di tale elemento deriva dalla divinità norrena Thor, simbolo Th ed è un elemento naturale debolmente radioattivo.

²⁸ *High Temperature Gas [Cooled] Reactor*

modularità che rende il progetto estremamente flessibile e scalabile, e dei tempi di implementazione relativamente veloci, consentendo quindi un ritorno economico in breve tempo. Infatti, possono essere installati in serie in un unico impianto, ad esempio una vecchia centrale a carbone, sfruttandone il collegamento alla rete elettrica; oppure distribuiti nella rete, per non essere costretti ad un upgrade di capacità di trasporto della rete; anche piccole Nazioni con vecchie reti potrebbero implementarli facilmente. Quello che è importante sottolineare è che diversi progetti hanno soluzioni tecniche performanti a livello di sicurezza e gestione dei rifiuti, quindi l'accettabilità sociale dovrebbe essere migliore, magari passando per delle installazioni demo. Inoltre, poiché più semplici e più sicuri, possono essere installati nelle vicinanze della zona da servire, senza vaste aree di rispetto. Questi SMR possono essere di terza o di quarta generazione, quindi con diverse tecnologie e design, possono avere un'autonomia anche di 25 anni senza ricariche (aumentando così il livello di sicurezza); alcuni progetti prevedono l'utilizzo di combustibile già utilizzato in altri impianti e immagazzinato come esaurito. Altro punto di forza, oltre alla capacità di inseguire le richieste della rete, è la cogenerazione flessibile di energia elettrica e, ad esempio, idrogeno e calore. Non è ancora possibile valutare l'impatto che avranno per il raggiungimento degli obiettivi NZE, ma le aspettative ed il sostegno politico finora ottenuto fanno ben sperare.

Attualmente ci sono circa 70 progetti in tutto il mondo, ma alcuni hanno già avuto il via libera. La Cina sta costruendo un suo progetto, l'ACP 100, con potenza di 385 MWt (Megawatt termici) e circa 125 MWe (Megawatt elettrici), mentre la Russia ha già un SMR su piattaforma galleggiante, la Akademik Lomonosov, di circa 70 MWe, ed il 21 aprile 2023 Rosatom, la società pubblica russa che raggruppa 360 imprese nel settore atomico, ha ottenuto la licenza per produrre un nuovo SMR terrestre, il RITM-200 da 55 MW. Anche Francia e Regno Unito stanno sviluppando ed ottenendo licenza per loro progetti; Canada e Stati Uniti hanno annunciato una prima distribuzione commerciale del reattore ad acqua bollente BWRX-300 da 300 MW, ed altri sono in via di acquisizione della licenza operativa o autorizzazione alla costruzione di un demo. Il Dipartimento dell'Energia degli Stati Uniti ha emanato delle disposizioni federali con lo scopo di accelerare lo

sviluppo di queste tecnologie per renderle operative entro il 2030, investendo 2,5 miliardi di USD (dollari statunitensi) per finanziarne test e demo, e premiando con 160 milioni di USD due promettenti prototipi, il Natrium da 345 MW di Terrapower, ed il Xe-100 da 80 MW di X-Energy.

Un vero e proprio altro capitolo è quello riservato alla fusione nucleare: al contrario della fissione, che prevede la scissione, cioè la divisione dell'atomo, con la fusione, come suggerisce il nome, due atomi si fondono e facendo questo rilasciano energia.

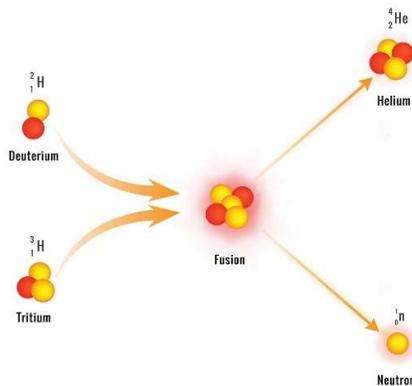


Figura 7: "La fusione nucleare" fonte: Mondadori Education.

Le stelle, come il nostro Sole, utilizzano questo meccanismo: portano la materia allo stato di *plasma*, altro stato della materia diverso da gassoso, liquido o solido, grazie all'enorme forza gravitazionale. Questo plasma deve avere una temperatura superiore a 10 milioni di gradi centigradi; nel

Sole, ad esempio, la temperatura è di 15 milioni di gradi. Come replicare e mantenere queste condizioni, è il grande cimento della scienza moderna: si tratta di fondere degli isotopi dell'idrogeno (Trizio e Deuterio), l'elemento più diffuso nell'intero universo, in un altro elemento, l'Elio, gas nobile ed innocuo. Quanto ne risulta non è la somma esatta degli atomi: parte della massa viene persa, e prodotta grandi quantità di energia. Einstein sintetizza questo processo con la famosa formula $E=mc^2$: m indica la minuscola massa, che moltiplicata per il quadrato della velocità della luce, esprime una enorme quantità di energia. Riguardo ai materiali necessari, il Trizio si può ottenere dal Litio, presente sul nostro pianeta in una quantità stimata di 89 milioni di tonnellate, mentre il Deuterio può essere facilmente estratto dall'acqua di mare, nella percentuale di un grammo su trenta litri, e da ogni grammo si può ottenere la stessa energia di trenta tonnellate di carbone.

Sulla Terra, con forza gravitazionale inferiore rispetto al Sole, per produrre il *plasma* è necessario raggiungere temperature di cento milioni di gradi centigradi ed un'altissima pressione, e tenerlo confinato in uno spazio limitato per aumentare la possibilità di collisioni ed innescare quindi la reazione a catena. Una sfida epocale, ma può essere il punto di svolta per l'esigenza di energia del genere umano: pochi grammi di materia possono produrre il fabbisogno energetico di una persona di un Paese sviluppato per sessant'anni; si potrà avere energia per milioni di anni per il

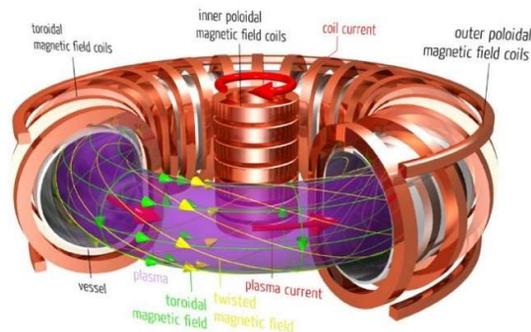


Figura 8: Schema di un Tokamak. Fonte: Cronache del Silenzio.

genere umano, senza rifiuti ed emissioni nocive. Ad oggi, è routine sperimentale generare la fusione, per brevissimi istanti, ma gli scienziati studiano come contenerla, dato le elevatissime temperature che si vengono a sviluppare, e

come rendere economicamente vantaggioso un impianto simile, generando più energia di quanto ne serva per innescarla. Gli impianti sperimentali utilizzano principalmente due sistemi per contenere il plasma ad alta temperatura: quello a “confinamento inerziale”, poco promettente, e quello a “confinamento magnetico”, il metodo più studiato consiste in un grande “ciambellone” elettromagnetico chiamato “Tokamak”, all’interno del quale viene fatto girare il plasma, senza che possa toccare le pareti; continuano gli studi anche sul modello chiamato “Stellarator”, che imprime anche una rotazione al campo magnetico creato in un “ciambellone”. Per ora solo degli impianti sperimentali sono stati attivati, e la produzione commerciale di energia elettrica con questa tecnologia sembra ancora lontana qualche decennio, ma si pensa che, superando i limiti tecnologici attuali, si potrà arrivare a 500 MW elettrici e 2 GW termici prodotti con solo 0,3 grammi di Trizio e Deuterio.

Per raggiungere questo fondamentale traguardo, già nella Seconda Conferenza di Ginevra nel 1958 le Nazioni iniziarono a collaborare e a scambiarsi informazioni.

In Europa, nel 1983 il *Joint European Torus* (JET), un toroide Tokamak voluto dalla Commissione Europea, ha prodotto il suo primo plasma, e da allora sono continuati gli studi. Nel 2007 sono iniziati i lavori di costruzione di ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*), il reattore sperimentale termonucleare internazionale più grande del mondo, a Cadarache nel sud della Francia, grazie all'accordo tra EURATOM (Commissione Europea), Cina, India, Giappone, Corea del Sud, Russia e Stati Uniti. L'intero sito è in un comprensorio di 42 ettari, il reattore pesa 23.000 tonnellate, un milione di componenti, dieci milioni di parti, porterà il plasma a 150 milioni di °C e genererà 500 MW in uscita. La creazione del primo plasma è prevista per il 2025, ed il raggiungimento della piena potenza dieci anni dopo, anche se ad oggi si riscontrano dei rallentamenti che forse ne allungheranno i tempi. Nel frattempo, entro il 2023 verrà completato il reattore a fusione JT-60SA, situato a Naka, in Giappone, in collaborazione con l'Europa, sempre nell'ambito dello sviluppo della tecnologia; dopo ITER infine partirà il progetto DEMO, una centrale elettrica dimostrativa che darà il via al collegamento in rete delle centrali a fusione, a partire presumibilmente dal 2050.

2.2 Confronto tra fonti energetiche

Ogni fonte energetica, ogni tecnologia per produrre energia, ha dei lati negativi e altri positivi, ed è necessario valutarli in modo olistico per comprenderne le potenzialità sfruttabili dall'uomo.

Il confronto tra fonti energetiche molto diverse tra loro deve essere fatto su più livelli, non solo le emissioni, ma l'impatto ambientale di tutta la filiera, la convenienza economica, il consumo di territorio, il costo e la reperibilità della materia prima, i rischi per la salute, l'accettazione sociale, i tempi di implementazione.

Gli strumenti più comuni per eseguire dei confronti sui dati sono i seguenti:

- Densità energetica:
che analizza quanta energia termica viene prodotta a parità di peso di materiale combustibile, oppure, nel caso dell'eolico e del fotovoltaico, quanta energia elettrica a parità di consumo di territorio.
- Fattore di capacità:
cioè, la percentuale di energia prodotta rispetto a quella che avrebbe potuto produrre lavorando sempre al massimo della capacità nominale; questo parametro è influenzato dalla continuità della fonte energetica e dagli stop per le manutenzioni o ricariche.
- LCA (Life Cycle Assessment)²⁹
che mette in evidenza l'impatto ambientale, di qualsiasi prodotto o servizio, nell'intero periodo di vita, dallo studio, alla costruzione, alla produzione e distribuzione, e per finire allo smaltimento finale.
- LCOE (Levelized Cost of Energy)³⁰
confronta le fonti energetiche dal punto di vista finanziario in base all'investimento economico (compresa la progettazione, la costruzione, l'esercizio, il costo della materia prima, lo smaltimento dei rifiuti ed il decommissioning), al rendimento economico stimato, i costi nascosti, come i tassi di interesse, tutto in un determinato periodo di tempo e rapportato alla quantità di energia prodotta; normalizza tutti questi dati in un unico sistema,

²⁹ Valutazione del ciclo di vita

³⁰ Costo livellato dell'elettricità

normalmente il costo al megawatt (€/MWh). Come tutte le stime, anche LCOE è soggetta a delle variabili: ad esempio la variazione del costo del combustibile nel tempo come anche l'ottenimento o meno di incentivi, la variazione dei tassi per i finanziamenti, e può variare anche da zona a zona in base a costi operativi e di mantenimento.

- Risk Assessment

si intende la valutazione del rischio verso le persone e verso l'ambiente, per ogni fase della tecnologia analizzata. La formula con la quale si rappresenta il rischio è: $R = P \times D$. Si tratta di tenere il Rischio in un livello accettabile, cioè il più basso possibile, tenendo basso i due parametri P (probabilità che un evento accada) e D (il danno che l'evento può produrre).

Tutti questi parametri, una volta analizzati, consentono di valutare quale sia la fonte, o il mix energetico, più performante in base alle richieste.

Relativamente alla *densità energetica*, partiamo dalle fonti che utilizzano combustibile: il truciolo di legno di recupero può produrre 12,5 Megajoule³¹ al chilogrammo (MJ/kg), mentre il pellet può arrivare a 17 MJ/kg. I combustibili fossili hanno una maggiore resa: si arriva a 33 MJ/kg per il carbone, 42 MJ/kg per il petrolio e 50 MJ/kg per il gas di petrolio liquefatto. Il combustibile per le centrali nucleari a fissione, il diossido di uranio arriva fino a 2.070.000 MJ/kg, ma teoricamente può arrivare anche ad 87.000.000 MJ/kg, sfruttando i sottoprodotti della fissione. (Luca Romano, 2022).

Per quanto riguarda le fonti che non usano combustibile ma che richiedono consumo di territorio per produrre energia, per generare la potenza erogabile da un singolo reattore nucleare, cioè mediamente 1,6 GW, sono necessari circa 20 km quadrati di pannelli solari con la tecnologia attuale (nota bene: produzione di picco, quindi con sole pieno perpendicolare ai pannelli); invece un parco eolico, cioè composto da turbine mosse dal vento che producono in media 10 MW ciascuna, poiché non possono stare una vicina all'altra per non togliersi il flusso d'aria, servono circa 160 km quadrati. Un impianto a combustione, come una centrale con un singolo reattore nucleare, richiede invece un paio di km quadrati, e non cambia

³¹ Joule (J) è l'unità di misura per l'energia.

molto se ha più reattori, perché molte parti possono essere in comune. In merito alle centrali idroelettriche, gli impianti sono relativamente piccoli, dovendo contenere solo le turbine per produrre l'energia elettrica, ma richiedono un grande accumulo d'acqua per garantire la produzione, e questo dipende dalla conformazione del terreno e dall'affluenza d'acqua dai bacini di invaso, non sempre si trovano queste condizioni, e creare laghi artificiali crea un consumo di territorio.

In questa prima analisi emergono già dei dati molto interessanti ma va valutato anche il cosiddetto *fattore di capacità*; una centrale nucleare, durante la propria vita operativa, mediamente produce l'intera potenza disponibile per il 92 - 93 % del tempo: gli stop della produzione sono necessari per cambiare il combustibile esaurito e per le normali attività di manutenzione. Medesima situazione si verifica anche con le centrali a combustione di fossile o di biomasse, che richiedono una normale manutenzione della caldaia e delle turbine; stessa cosa per le centrali idroelettriche. Cala drasticamente il fattore di capacità degli impianti fotovoltaici ed eolici, legati alla disponibilità del sole o del vento. I pannelli solari producono energia per alcune ore al giorno, non tutti i giorni e non tutte le stagioni allo stesso modo: in base alla latitudine e caratteristiche del territorio dove sono si arriva ad un fattore di capacità mediamente del 18 %. Le turbine eoliche hanno una capacità molto variabile in base alla locazione dove vengono installate: gli impianti offshore, cioè in alto mare, in zone molto ventose, arrivano al massimo al 40 % ma nel nostro Paese mediamente non si supera il 20 %, poiché scarsamente ventoso.

Il metodo di analisi *LCA*, come evidenziato sopra, prende in considerazione ed analizza tutti i processi necessari alla trasformazione di una materia prima in energia elettrica e ne calcola l'impatto ambientale diviso per tipologia: infatti il cambiamento climatico sottolinea la necessità di ridurre le emissioni di gas serra (GHG³²) come la CO₂, ma per ottenere questo non si può certo impattare nell'ambiente in altre modalità come consumo indiscriminato del territorio, deforestazione, attività mineraria con produzione di inquinamento ambientale.

Il consumo di energia è fondamentale per l'essere umano ed il suo benessere; consumiamo energia per camminare, per vivere, e questa ci arriva dal cibo: se manca il cibo, manca l'energia necessaria alla crescita ed alla vita. Si può ridurre

³² *Green House Gases*: gas ad effetto serra

l'esigenza di energia al minimo, modificando però lo stile di vita: ma è accettabile? Detto questo, l'unica fonte energetica a zero impatto ambientale è quella risparmiata: qualsiasi altra modalità prevede almeno un impatto sull'ambiente, più o meno accentuato; diventa quindi importante fare delle stime ed efficientare al massimo ogni singolo passaggio.

Partendo da questo presupposto, possiamo indicare i parametri delle tre grandi categorie di sistemi di produzione: fonte fossile, nucleare e fonti rinnovabili.

Lifecycle greenhouse gas emission ranges for the assessed technologies

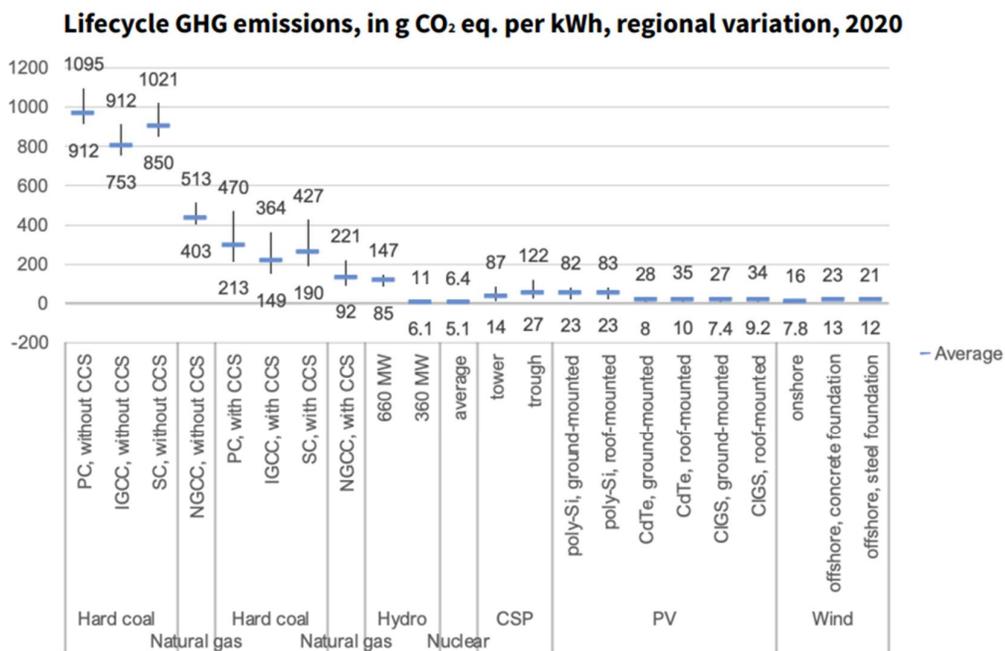


Figure 9: United Nations Economic Commission for Europe, 2022

Glossario:

- PC: Pulverized coal
- IGCC: Integrated gasification combined cycle
- NGCC: Natural gas combined cycle
- CSP: Concentrated Solar Power
- PV: Photovoltaic

Il carbone, che copre circa il 34% della produzione di energia globale, e i derivati dal petrolio sono i sistemi a più alta emissione di CO₂, dovuti sia alla fase della

trasformazione in energia (tramite combustione), sia alla estrazione e trasporto della materia prima; la quantità di CO₂ può essere dimezzata utilizzando strumenti di cattura, utilizzo e immagazzinamento (CCS-CCUS)³³, che diventano importanti nella fase di transizione fino al *phase-out* delle centrali a combustibile fossile, anche se la convenienza economica è tutta da dimostrare. Anche il gas naturale seppur avendo minor emissioni rispetto al carbone o ad altri derivati dal petrolio, a livello di impatto ambientale è di un ordine di grandezza superiore alle fonti energetiche nucleare e rinnovabili. Le emissioni di gas serra, per le fonti fossili, sono presenti non solo nella combustione e produzione di energia elettrica, ma anche nell'estrazione (gas metano naturale presente nelle miniere) e nel trasporto, a causa di perdite nei condotti.

L'energia idroelettrica e la nucleare si contendono il primo e secondo posto tra i migliori profili eco-compatibili a ridotte emissioni tra le fonti energetiche, con valori di 20 volte inferiori a quelle del carbone e un decimo rispetto al solare ed eolico (Bruno Notarnicola, 2022). Questo dato deriva dal valore bassissimo di emissioni di CO₂ nell'atmosfera, ma mitigato dal consumo d'acqua e dalle radiazioni ionizzanti dei materiali usati e di scarto (anche se le nuove tecnologie sono in fase di studio per produrre meno scarti e riutilizzare quelli già prodotti). L'idroelettrico utilizza prevalentemente sistemi di accumulo artificiali generato con delle dighe, per il resto l'impianto occupa poco spazio; però tale costruzione non è possibile ovunque ma in ambienti ricchi d'acqua e con rilievi che consentono lo sfruttamento dell'energia potenziale che l'acqua accumula.

Lo sfruttamento delle maree è in una fase ancora embrionale, e per il momento non è significativa all'apporto di energia a livello globale ma ancora di nicchia.

Relativamente al nucleare, LCA valuta l'estrazione e la lavorazione del combustibile fissile, la costruzione e il successivo *decommissioning* della centrale nucleare, oltre al consumo d'acqua necessario (trasformato in vapore e che quindi dopo rientra nel ciclo dell'acqua) per il raffreddamento ed ovviamente la gestione dello scarto dei rifiuti radioattivi. La maggior parte delle emissioni di gas GHG, sono durante il *mining* (cioè, la fase estrattiva del combustibile), il successivo trasporto e la raffinazione, e dovute principalmente ai macchinari utilizzati.

³³ *Carbon Capture and Storage – Carbon Capture Usage and Storage*

Ulteriore fonte di inquinamento considerata sono le radiazioni ionizzanti, derivate dal materiale naturalmente radioattivo. “L’IPCC³⁴ caratterizza l’energia nucleare come in grado di fornire elettricità a basse emissioni di carbonio a lungo termine su larga scala”. (UNECE, 2022)

Le fonti rinnovabili sono prevalentemente a basse emissioni, ma risentono dell’inquinamento prodotto o del consumo del territorio; ad esempio, le biomasse sono considerate rinnovabili ma non del tutto sostenibili in quanto bruciando combustibile di vario tipo producono CO₂, o necessitano di combustibile che richiede un periodo di tempo lungo per essere ripristinato (ad esempio, bruciando un albero si ottiene la stessa CO₂ che ha assorbito durante la sua crescita, che però è molto lenta). Anche lo sfruttamento di combustibili di origine vegetale (ad esempio, olio di colza, trasformato in biodiesel) comporta impatto ambientale di diverso tipo, sia nelle emissioni di CO₂ sia nello sfruttamento di risorse, acqua e terreno, sottratte all’agricoltura per alimentazione umana. Per quanto riguarda il biogas, di origini biologiche in quanto derivante da liquami animali o scarti digeriti da microrganismi, è rinnovabile sicuramente ma in quantità limitata; è comunque importante perché va ad utilizzare materiale altrimenti di scarto.

Il fotovoltaico: l’estrazione delle terre rare³⁵, indispensabili per produrre pannelli fotovoltaici o batterie per l’accumulo, comporta ampi volumi di terreno trattato in modo chimico con alti tassi di inquinamento; vengono utilizzati dall’industria di raffinazione prodotti altamente tossici come acido solforico, acido fluoridrico e anidride solforosa. Da quanto si sa ad oggi, le terre rare si trovano al 36% in Groenlandia (per ora poco sfruttate), al 32% in Cina e al 18% in Australia; se ne trovano in quantità minore anche negli Stati Uniti e in Malawi (Nucleare e ragione, 2015). Incide nel LCA anche il trasporto delle materie prime alle aziende produttrici di pannelli fotovoltaici, prevalentemente dislocate in Cina, e da queste ai siti di installazione.

Per quanto riguarda il decommissioning si riesce ad oggi a separare e riutilizzare fino al 98% di un pannello fotovoltaico.

³⁴ *Intergovernmental Panel on Climate Change*: Gruppo intergovernativo sul cambiamento climatico

³⁵ Con questo termine si indicano alcuni elementi naturali di difficile estrazione.

L'eolico ha un costo ambientale legato all'uso di terre rare come per il fotovoltaico, ed al consumo di territorio, poiché ogni pala eolica deve avere un km quadrato a disposizione per non rubare il vento ad altre; gli impianti off-shore installati in mare compensano i maggiori costi di installazione, dovuti anche alla rete elettrica necessaria a collegarli, con una maggiore produzione di energia legata molto al luogo dove vengono posizionati (certi tratti di mare sono sicuramente più ventilati ed idonei ad installazioni di questo tipo).

Va citato anche il geotermico, che in Italia produce il 5% del fabbisogno di energia elettrica, mentre nel mondo sono 27 le Nazioni che sfruttano la geotermia. Oltre all'installazione delle centrali di sfruttamento, l'impatto ambientale si ha nelle emissioni di anidride carbonica ed idrogeno solforato, anche se in dosi inferiori alle fonti fossili.

Come già accennato, un'altra modalità di confronto tra sistemi energetici così diversi è il Levelized Cost Of Energy, o LCOE; è un parametro che è soggetto a molte variabili, quindi, anche se prende in considerazione un arco di tempo di decenni, in realtà può variare molto nel periodo sia per il contesto politico che per la regione dove viene analizzato. Per questo motivo è da considerarsi come una stima, basata su dati concreti, ma comunque una stima, una proiezione, e può essere diversa in base allo scenario previsto.

In base all'ultimo rapporto prodotto congiuntamente dalla IEA³⁶ e dalla NEA³⁷ nel 2020, relativo all'analisi dei costi di 243 impianti di generazione elettrica di differente tecnologia di 24 Nazioni diverse, appartenenti all'OCSE³⁸ e non, il grafico seguente mostra a parità di tasso di sconto, stimato del 7 %, i diversi LCOE delle varie fonti energetiche. Il tasso di sconto è il costo applicato all'investimento per la costruzione di nuove centrali, ed è fortemente influenzato dalla certezza del completamento e della resa del progetto.

Come si può notare alcuni tipi di fonte energetica più che un valore hanno un range di valori ed un valore medio, in base a diversi fattori, tra cui la Nazione dov'è

³⁶ International Energy Agency

³⁷ Nuclear Energy Agency

³⁸ Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico

situato, la variabilità e disponibilità del costo del combustibile, e da molti altri fattori.

È evidente che la generazione di energia elettrica con sistemi a basse emissioni di carbonio hanno dei costi che si stanno continuamente abbassando, risultando sempre più competitivi rispetto alla generazione tramite combustibili fossili. L'eolico *onshore*³⁹ risulta essere il più conveniente di tutti (50 USD/MWh), battuto solamente dalle centrali nucleari con la licenza operativa prolungata (LTO) con un valore di 32 USD/MWh, che nonostante i costi di manutenzione straordinaria, risultano estremamente convenienti.

Il solare fotovoltaico su larga scala e condizioni climatiche favorevoli, si attesta ad un valore medio di 56 USD/MWh; l'idroelettrico con bacini di riserva si aggira ad un valore medio di 72 USD/MWh e infine il geotermico con un valore medio di 99 USD/MWh. Nel caso dei combustibili fossili il più conveniente è ancora il gas con 71 USD/MWh, anche se la tecnologia con il recupero della CO₂ si attesta a 91 USD/MWh (IEA, 2020).

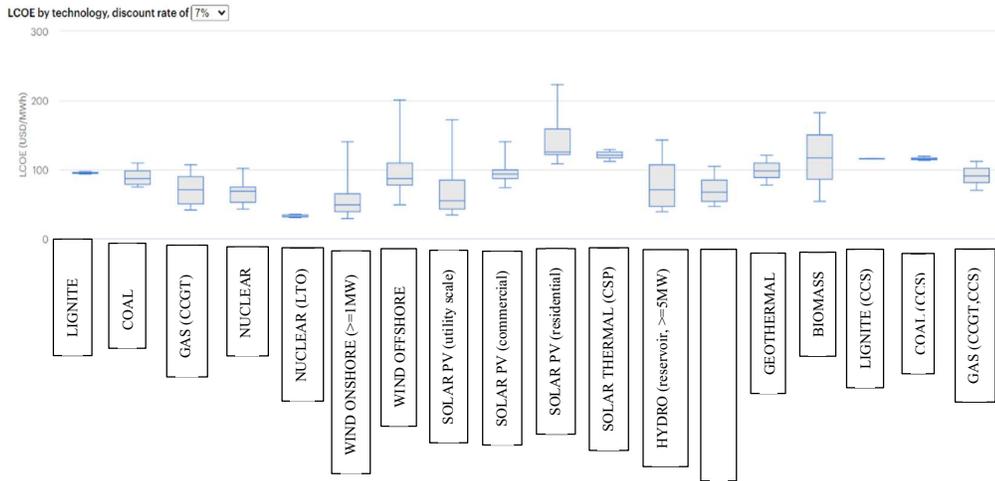


Figure 10: 'LCOE USD/MWh' fonte: IEA, 2020

³⁹ Cioè, l'eolico installato sulla terraferma

I limiti del LCOE sono noti poiché prendono in considerazione solamente i costi delle diverse tecnologie ma non il loro valore, in quanto costo e valore sono cose diverse.

Per rendere più evidente questa differenza, l'IEA ha sviluppato un ulteriore sistema di calcolo aggiungendo il valore che una fonte energetica ha all'interno di un particolare sistema energetico; in effetti, all'aumentare delle fonti rinnovabili intermittenti (solare ed eolico) in un mix energetico di una Nazione, viene a mancare la stabilità del sistema che quindi deve essere garantita da altre fonti con livelli di produzione più continuativi, come il nucleare, o con possibilità di *ramp up*⁴⁰ molto veloci, come il gas. Il metodo di calcolo VALCOE (*Value-Adjusted Levelized Cost of Energy*) inoltre considera anche i costi delle interconnessioni del sistema alla rete e dell'eventuale necessario stoccaggio dell'energia di *backup*; con le implementazioni di queste variabili al LCOE, lo scenario cambia radicalmente: infatti le fonti di energia intermittenti hanno bisogno di *storage* costosi per coprire le fasce orarie di mancata produzione (ad esempio di notte o d'inverno o in assenza di vento).

Il VALCOE diventa quindi uno strumento fondamentale per i governi delle Nazioni, per valutare la composizione del mix di fonti energetiche che devono implementare per garantire l'economia e la stabilità della rete energetica nazionale.

In base alla tecnologia presa in analisi, si possono riscontrare livelli di *rischio* diversi che possono portare a dei danni più o meno impattanti sulla vita umana e sull'ambiente. Ad esempio, l'attività di estrazione del carbone è molto rischiosa: molti sono i casi di esplosione e di crolli nelle gallerie con centinaia di morti, come successe a Marcinelle (Belgio) nel 1956, dove perirono 262 minatori, in gran parte italiani emigrati. Ulteriore caso da sottolineare è l'incendio nel giacimento di carbone di Jharia, nell'est dell'India: tale giacimento, stimato in quasi 20 miliardi di tonnellate di carbone, sta bruciando sotterraneamente almeno dal 1916, causando grandi emissioni nell'atmosfera, inquinamento del suolo e l'evacuazione di centinaia di migliaia di persone, a causa del territorio diventato insalubre.

⁴⁰ Aumentare la produzione di energie in tempi brevi.

Anche la costruzione di impianti fotovoltaici ed eolici, piuttosto che di sistemi di accumulo, non sono esenti da impatto ambientale: ad esempio, il lago nero di Baotou, situato nella Mongolia interna, nella Repubblica Popolare Cinese, è un “lago” interamente formato da scarichi chimici e radioattivi, altamente tossici, dovuti all'estrazione di terre rare, che a partire dal 1958 diventa sempre più grande (ad oggi circa 11 km quadrati), poiché tutte le industrie della zona che lavorano le terre rare versano indiscriminatamente e senza nessun controllo tutti gli scarti industriali in questo lago a cielo aperto. L'inquinamento dell'aria e del suolo è elevato: il rischio ora è che raggiunga le falde acquifere del Fiume Giallo, che fornisce l'acqua a 150 milioni di persone.

LCA quindi, evidenzia come il fotovoltaico e l'eolico, prese nel loro insieme, non siano esattamente a impatto ambientale zero.

La fonte energetica che sembra più innocua è l'idroelettrico: se capita di andare in montagna, spesso ci si imbatte in dighe artificiali che delimitano pacifici laghetti tra scoscese pareti, e vicino piccole costruzioni in cemento armato che non emettono un filo di fumo. Però quelle masse d'acqua hanno una potenza che può essere micidiale: ricordiamo senz'altro il disastro del Vajont, nel 1963, dove una diga costruita senza considerare le condizioni geologiche, e dove il guadagno di pochi ha influito sulla vita di molti; il monte Toc, franato dentro al bacino pieno d'acqua, creò un'onda altissima che investì alcuni centri abitati, principalmente Longarone, causando 2.018 vittime e distruggendo tutto quanto ha incontrato nel suo cammino. Molti altri incidenti sono capitati in bacini idroelettrici in altre Nazioni, ma il più devastante è sicuramente quello successo in Cina, alla diga di Banqiao, alta 118 metri che normalmente tratteneva 500 milioni di metri cubi d'acqua, ed inserita in un sistema di altre 60 dighe. Un evento di portata eccezionale, il super tifone Nina, che si è scontrato con un fronte di aria fredda, ha portato delle piogge di tale intensità che le dighe non riuscirono a contenere, e provocò un'ondata come uno tsunami, alta circa 7 metri e larga oltre 10 km, causando nell'immediato, e nei giorni successivi a causa dell'isolamento dei superstiti e delle epidemie occorse, circa 171.000 morti. In questo caso, l'evento eccezionale ma anche la volontà di risparmiare, determinò l'incidente: l'ingegnere

che progettò la diga voleva molte più paratie di sfogo dell'acqua, ma le autorità lo licenziarono e ne fecero meno della metà di quanto il progetto prevedeva.

Il gas, per sua natura estremamente volatile ed infiammabile, è stato causa negli anni di molteplici incidenti sia durante l'estrazione, che durante la trasformazione in energia, ma anche nel trasporto. Un caso emblematico, quello di Viareggio nel giugno 2009: deragliò un treno che trasportava GPL, che esplose e provocò la morte di 32 persone ed il ferimento di un altro centinaio. La mancanza di una corretta manutenzione aveva provocato la rottura di un asse di un vagone cisterna. Relativamente al petrolio, la cronaca riporta numerosi incidenti a piattaforme di estrazione (come la Deepwater Horizon), petroliere che si spezzano rovinando interi ecosistemi (per esempio, petroliera Exxon Valdez), pozzi dati alle fiamme durante la guerra in Kuwait: difficile elencarli tutti.

Di seguito un breve riepilogo comparativo tra le varie fonti energetiche rinnovabili o comunque sostenibili:

Fonte rinnovabile/sostenibile	Vantaggi	Svantaggi
biomassa	-Abbondante in natura -Si possono utilizzare prodotti di scarto	-La biomassa che viene bruciata provoca emissioni di inquinanti -Potrebbe non essere fattibile per analisi costi-efficacia
geotermica	-Fornisce un'illimitata scorta di energia pulita	-Costi elevati di sviluppo della tecnologia -Costi elevati di manutenzione a causa della corrosione
idroelettrica	-Abbondante, pulita, sicura -Facilmente accumulabile in serbatoi	-Può causare l'allagamento delle zone circostanti

	<ul style="list-style-type: none"> -Sistema relativamente economico per produrre energia elettrica 	<ul style="list-style-type: none"> -Le dighe possono impattare molto sull'idrologia locale -Può essere usata solo se c'è disponibilità di acqua -I migliori siti per la costruzione di dighe sono già sviluppati
mareomotrice	<ul style="list-style-type: none"> -Ideale per le isole -Sfrutta un'energia che altrimenti andrebbe persa 	<ul style="list-style-type: none"> -Costi nella realizzazione dell'impianto -Potrebbe avere un impatto negativo sulla fauna marina -Gli impianti occupano molto spazio e rendono difficoltosa la navigazione
Solare fotovoltaico	<ul style="list-style-type: none"> -Fonte potenzialmente infinita -Non causa inquinamento di aria ed acqua localmente 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevate superfici per l'installazione degli impianti di grande capacità -Accumulo ed energia di riserva sono necessari -L'affidabilità dipende dalla disponibilità della luce solare - Attività estrattiva delle terre rare molto inquinante e in regime di monopolio (Cina)

eolica	-Non causa inquinamento di aria ed acqua -Impianti relativamente economici da costruire -Le terre intorno all'impianto si possono utilizzare per altri scopi	-Richiesta di una quantità costante e significativa di vento -Elevate superfici per l'installazione degli impianti -Necessità di migliori soluzioni per la cattura di energia
nucleare	-Elettricità senza emissioni di CO ₂ -Ridotta occupazione di terreno -Molta energia prodotta -Fonte energetica continua	-L'uranio non è rinnovabile -Costi iniziali molto alti -Gestione delle scorie nucleari -Gli incidenti possono essere catastrofici

Tabella 1: “vantaggi e svantaggi delle tecnologie rinnovabili/sostenibili”. Fonte: Biopils,2019; Geopop, 2022.

2.3 Mix energetico: le potenzialità del nucleare

L'accordo di Parigi del 2015, sottoscritto da 183 su 195 Paesi membri del UNFCCC⁴¹, ha stabilito l'ambizioso obiettivo di arrivare a zero emissioni di gas serra entro il 2050, per contrastare i cambiamenti climatici dovuti alle attività antropiche.

Con questo accordo si vuole mantenere l'aumento della temperatura media mondiale sotto i 2°C, possibilmente 1.5°C, rispetto al valore medio nel periodo precedente quello industriale; la roadmap indicata mette in campo sia ingenti risorse economiche, tramite una facilitazione di flussi finanziari e incentivi, sia promuovendo gli studi e le implementazioni di nuove tecnologie in merito al risparmio energetico, e soprattutto all'abbandono delle fonti fossili per la produzione di energia: elettrica, termica e per la mobilità. La produzione di energia

⁴¹ United Nations Framework Convention on Climate Change

elettrica sarà la prima a raggiungere la NZE, ma la produzione e distribuzione di calore, per riscaldamento o per l'industria, è responsabile del 4% delle emissioni totali di CO₂, come anche la produzione di idrogeno; per eliminare anche questa fonte di inquinamento, sarà quindi necessaria una riconversione all'elettrico, oppure lo sfruttamento dell'energia termica residua dei reattori nucleari, soprattutto degli SMR.

Per mettere in evidenza, e per dare gli strumenti decisionali agli enti e Paesi interessati, l'IEA (International Energy Agency), alla quale aderisce anche l'Italia, ha prodotto uno studio edito nel settembre 2022 nel quale propone diversi scenari relativi all'approvvigionamento energetico da fonti a basse emissioni, prendendo in considerazione l'impatto ambientale, economico e geopolitico; da questa analisi si evidenzia chiaramente come il mantenimento ed il progressivo aumento della capacità produttiva di energia nucleare sia effettivamente la strategia migliore, a breve o medio termine, in affiancamento alle rinnovabili. Attualmente, nonostante nei decenni scorsi i programmi nucleari di molti Paesi abbiano subito rallentamenti od arresti, come in Italia, nel mondo la produzione di energia dal nucleare si attesta al 10%, seconda tra le rinnovabili solo all'idroelettrico.

Dati alla mano relativi alla fine del 2021, l'energia dal nucleare, con i suoi 413 Gigawatt (GW) operativi in 32 Paesi nel mondo con 439 reattori totali, evita l'emissione in atmosfera di 1,5 Gigatonnellate (Gt) di CO₂ nell'atmosfera ed il consumo di 180 miliardi di metri cubi di gas, all'anno: in pratica hanno evitato negli anni il 6% in più di emissioni, il 20% se si considera la sola componente energia. Molte Nazioni hanno attivato un proprio programma nucleare, ma le battute d'arresto create dall'opinione pubblica a causa dei tre principale incidenti, Three Mile Island nel 1979, Chernobyl nel 1986 e Fukushima nel 2011, hanno generato politiche altalenanti relative ad ulteriori investimenti negli impianti nucleari: dal 2017 sono iniziati i lavori di costruzione di 31 reattori, dei quali 17 progetti russi (in Russia, Turchia, India, Cina, Bangladesh e Iran), 10 cinesi (tutti in Cina), 2 coreani in Corea, e due in UK di progettazione europea. In prospettiva, i reattori in Europa hanno l'età media più alta, 38 anni, contro i 36 degli USA, i 15 dell'India o i 5 anni per quelli della Cina. Quest'ultima sta dimostrando di puntare molto nelle fonti rinnovabili, ma sicuramente il nucleare avrà una parte sempre più importante

nel mix energetico che vuole avere, come anche il Regno Unito, la Francia, la Polonia, la Corea, l'Olanda, il Canada, il Giappone e l'India, che hanno annunciato strategie energetiche dove il nucleare avrà una parte fondamentale. Gli Stati Uniti, nel frattempo, valutano le proroghe delle licenze di esercizio per molti loro impianti di 10 o 20 anni, dopo opportune verifiche e manutenzioni (come anche la Francia del resto), con un investimento di 6 miliardi USD, e nel frattempo investono in progetti di reattori avanzati. La Germania invece è andata in senso opposto, spegnendo progressivamente le proprie centrali nucleari, implementando fotovoltaico e rinnovabili, ma ritornando al gas (che importa) ed al carbone, di cui è ricca, per fornire la necessaria flessibilità.

Per arrivare all'obiettivo NZE (*Net Zero Emission*) il nucleare può dunque fare la sua parte, ma non si tratta solo di affrontare sfide tecnologiche, ma anche economiche, politiche, sociali. L'estensione della vita degli impianti, cosiddetta *Long Term Operation (LTO)* è sicuramente una strategia importante, in quanto molte risultano essere, grazie a continui upgrade tecnologici e di sicurezza, ancora in buone condizioni, come evidenzia la Nuclear Energy Agency con il proprio report⁴², sottolineando come la vita operativa stimata non è una scadenza operativa, ma deve essere intesa come una valutazione ad ampio spettro dell'efficienza dell'impianto, e la possibilità e convenienza nel proseguo dell'esercizio: infatti, anche se hanno una resa energetica minore rispetto alle più recenti, visto il basso costo dell'uranio, farle continuare è economicamente vantaggioso. Mantenere economicamente competitivo il nucleare nei confronti dell'eolico e del fotovoltaico è fondamentale: l'energia dal nucleare consente di avere un servizio continuato e senza interruzioni, andrebbe pagata di più, è senz'altro più preziosa; in generale, in molti Paesi l'energia a basse emissioni non è adeguatamente remunerata. Soprattutto per agevolare questa nuova era del nucleare, l'IEA suggerisce diverse strategie per attrarre investimenti privati, e ridurne significativamente i costi: i metodi collaudati sono la finalizzazione dei progetti prima di iniziare la costruzione, per evitare poi attese degli organi di controllo quando si è già esposti

⁴² NEA-OECD, *Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies*, 2021

finanziariamente, inoltre poi replicare i progetti, ed ancora replicarli negli stessi siti. Ma anche i mercati devono tenere conto che non si può pagare tutta l'energia allo stesso modo: la maggior flessibilità produttiva, come anche la scalabilità, diventano ancora più preziose poiché garantiscono la stabilità della rete, soprattutto in mix energetici con elevata presenza di eolico e fotovoltaico, e che altre fonti come l'idroelettrico, il geotermico e l'idrogeno per ora non riescono ad avere (Department for Business, Energy and Industrial Strategy, 2022).

Nel Regno Unito il 31 marzo 2022 è stato approvato il modello economico RAB (*Regulated Asset Base*, Capitale Investito Regolatorio) anche per il nucleare, meccanismo che consente al Segretario di Stato di certificare una società, che abbia già un progetto di centrale nucleare sviluppato, di ottenere ulteriore supporto per la progettazione, costruzione, messa in servizio e funzionamento, riducendo in modo significativo i tempi, calcola il rischio ed i ricavi dovuti agli investitori, ne garantisce un rientro economico già in fase di progettazione avanzata, e lo inserisce nella bolletta degli utenti. Questo meccanismo, già usato per molti settori critici come acqua, gas ed elettricità, consente una migliore performance economica dovuta alla sicurezza di rientro dei capitali investiti e quindi una maggior raccolta di capitali nel mercato, e dovrebbe garantire un miglior rapporto qualità-prezzo dell'energia all'utente. Inoltre, dovrebbe velocizzare i tempi di completamento dei progetti, garantendo la messa in servizio in cinque anni, contro i 16-17 necessari per i due reattori EPR di terza generazione avanzata da 1600 MW, nelle centrali di Flamanville in Francia ed Olkiluoto in Finlandia, e contenere i costi, lievitati ad esempio, sempre per questi due reattori, di quattro volte, anche perché primi nel loro genere.

Altri importanti strumenti utili a far confluire capitali alle fonti energetiche a basse emissioni, e quindi anche al nucleare, sono l'*Emission Trading Scheme* (ETS) e la Carbon Offset; si tratta in pratica di sistemi di compravendita di certificati di emissioni tra industrie che emettono gas climalteranti, ed altre che le riescono a ridurre o azzerare. Questo meccanismo genera un flusso di denaro dove ridurre le emissioni costa meno oppure è più semplice da fare, portando comunque ad un abbattimento delle emissioni. Però, mentre con la *Carbon Offset*, l'Ente che rilascia il certificato non stabilisce limiti, la ETS invece pone un tetto, chiamato CAP, che

si riduce di anno in anno, generando un circolo virtuoso. Sono strumenti in realtà già esistenti da diversi anni, e coprono circa il 21% delle emissioni di gas serra; si tratta però di renderli ancora più efficienti, in modo da disincentivare sempre di più l'uso dei combustibili fossili, a vantaggio dei sistemi a basse o nulle emissioni.

L'IEA valuta in modo positivo l'interesse che molte Nazioni dimostrano verso gli SMR, come gli Stati Uniti con una serie di sovvenzioni alla R&D (*Research and Development*), ma anche il forte sostegno dei governi di Canada, Francia e Regno Unito, ma anche Russia e Cina: ritiene però fondamentale decidere ora per arrivare ad averli nel prossimo decennio.

Tra le raccomandazioni ai responsabili politici delle Nazioni che intendono produrre energia nucleare, c'è anche il coinvolgimento della popolazione nelle decisioni consapevoli, promuovere l'informazione ed il dialogo, attivare progetti campione e renderli visitabili al pubblico, combattere l'effetto NIMBY per quanto riguarda la conoscenza, rendere trasparente ogni fase decisionale, anche in quello della gestione dei rifiuti, ed infine rendere apprezzabili agli utenti i risparmi energetici ecosostenibili. Fondamentale inoltre garantire capacità ed indipendenza di organi di controllo internazionali, che abbiano la forza di imporre regolamenti e la trasparenza necessaria per dare fiducia.

Secondo l'ACER, Agenzia dell'UE per la cooperazione tra regolatori dell'energia (ad esempio in Italia è l'ARERA), nel 2022 i prezzi dell'energia sono stati più alti in media del 30%, con punte più alte dove la dipendenza dal gas è maggiore, come la Spagna (55%) e l'Italia (addirittura 80%); questo ulteriore shock energetico, nei prezzi e nella disponibilità, offre quindi un'apertura politica al nucleare, anche perché il combustibile oggi più usato, l'uranio, non è in regime di pochi Paesi politicamente instabili, ma è molto diffuso, ed in grado di essere immagazzinato per alcuni anni. Anche se l'uranio è per il 38% di provenienza russa, e l'arricchimento dell'uranio per l'energia viene fatto per il 41% in Kazakistan, questo dipende solo dalla convenienza economica del momento, poiché molte nazioni hanno deciso di tenere chiuse le proprie miniere visto il basso costo nel mercato, ma rimangono una riserva strategica in caso di tensioni con i fornitori.

2.4 Ulteriori applicazioni del nucleare

Un reattore nucleare, oltre a produrre notevoli quantità di energia elettrica, produce anche molta energia termica, a sua volta sfruttabile per numerose applicazioni; le principali sono la produzione di idrogeno, la distribuzione su larga scala di calore a basse emissioni alle industrie, ed alle abitazioni ed uffici come teleriscaldamento.

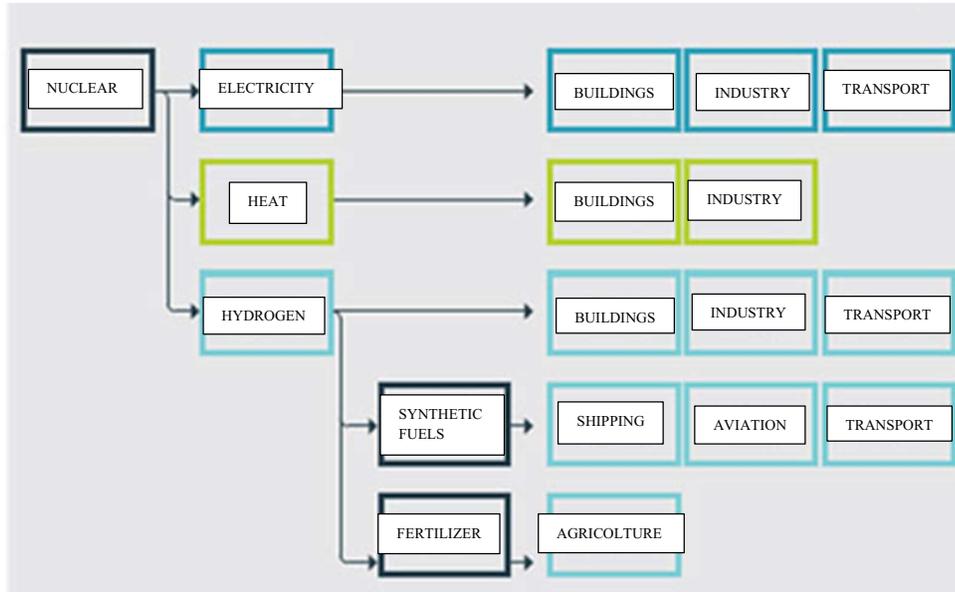


Figura 11: "Il ruolo dell'energia nucleare per la decarbonizzazione profonda di elettricità, calore e idrogeno". Fonte: l'Astrolabio

L'idrogeno è importante come materia prima nell'industria chimica e nelle raffinerie di petrolio; viene miscelato al gas naturale per ridurre le emissioni nella combustione, oppure direttamente per produrre energia tramite celle a combustibile, mentre sembra ancora più promettente l'uso in forma di ammoniaca, cioè miscelato all'azoto (NH₃), perché più facilmente immagazzinabile e trasportabile; se ne valuta inoltre l'utilizzo come carburante per motori, ad esempio per la navigazione marittima, responsabile ad oggi del 2% delle emissioni globali (Marzia Campioni, 2022). L'idrogeno può essere prodotto dal calore residuo di una centrale nucleare tramite termo-elettrolisi ad alta temperatura, come anche direttamente dall'energia elettrica in eccesso, cioè non necessaria nella rete: una centrale nucleare può fornire entrambe le fonti di energia, e l'installazione di un elettrolizzatore in prossimità sarebbe altamente efficiente, anche se si valuta sarà una tecnologia disponibile solo dal 2030. L'uso dedicato dell'energia nucleare alla produzione di idrogeno è attualmente non competitivo con le rinnovabili, ma potrebbe diventarlo riducendo

i costi delle centrali, e già lo è se si utilizza l'energia prodotta in eccesso. L'energia elettrica di un reattore si può usare anche per desalinizzare l'acqua del mare: infatti, solo il 2,5 % dell'acqua del pianeta è potabile, e molti sono i territori abitati che troverebbero grande vantaggio da questo sistema; è possibile costruire impianti di questo tipo on-shore, ma la nave Russa "Akademik Lomonosov" può assolvere già a questa funzione. Questo progetto è in realtà una centrale nucleare galleggiante, non costruita per la navigazione ma solo per fornire supporto energetico in modo veloce in aree altrimenti prive; monta un reattore con tecnologia ad acqua pressurizzata, sistema usato nella maggior parte delle centrali nucleari esistenti e da decenni collaudato nelle navi rompighiaccio nell'Artico.

Relativamente al calore, i processi industriali oggi coprono i due terzi della domanda, di cui almeno metà ad alta temperatura (sopra i 400°C), e grandi obiettivi si possono raggiungere decarbonizzando questi processi; il teleriscaldamento è una realtà già da molti anni in Europa e nei Paesi dell'ex Unione Sovietica, ed anche la Cina sta adottando la cogenerazione dal nucleare in molte città del Nord. Questo implica chiaramente l'accettazione sociale della risorsa nucleare vicina alle abitazioni, che potrebbe essere agevolata con l'avvento degli SMR, molto meno impattanti.

Naturalmente il nucleare da decenni è usato anche in medicina, sia nella diagnostica che nelle cure. In diagnostica, si usano molto le radiografie, ma anche scintigrafie e TAC (tomografia assiale computerizzata), che grazie a delle piccole dosi di radiazioni assolutamente innocue (chiaramente non in numero illimitato), producono delle immagini interne di un corpo umano senza dover affrontare un intervento chirurgico; a volte si usano anche dei liquidi di contrasto, radio-opachi, che sono ideali per diagnosticare sistemi vitali come vasi sanguigni, o l'interno dell'apparato gastrointestinale, o quello urinario. Ma anche la radioterapia, cioè la cura di determinate patologie con le radiazioni, ha una storia ormai secolare. Infatti, colpendo delle cellule tumorali con delle radiazioni, queste muoiono e vengono espulse dal corpo; se vengono colpite anche cellule sane contigue, queste hanno un principio di autoriparazione migliore di quelle tumorali, riducendo quindi i collaterali (AIRC, 2020).

CAPITOLO III

PANORAMA DEL DIRITTO DEL NUCLEARE

3.1 Normative e incentivi a livello mondiale

Il problema del cambiamento climatico è stato posto come uno delle più grandi sfide che l'uomo è chiamato ad affrontare entro il prossimo futuro. Durante la conferenza delle Nazioni Unite tenutasi a Rio de Janeiro, chiamata "Vertice della Terra", i rappresentanti di 172 paesi hanno discusso relativamente ai problemi che affliggono la società moderna, quali: la disparità fra paesi industrializzati e quelli in via di sviluppo, la povertà e le difficoltà in ambito economico, sociale ed ambientale, e ponendo le basi di una cooperazione tra le Nazioni per raggiungere importanti obiettivi tramite un processo condiviso siglando l'accordo UNFCCC⁴³. Con questo atto si sancisce la presa di consapevolezza che il cambiamento climatico esiste ed è un problema globale, e che va affrontato in modo sinergico e cooperativo da tutte le Nazioni, che le Nazioni più progredite sono quelle che incidono su questi cambiamenti e che si devono impegnare per aiutare le economie emergenti dei Paesi più poveri, per tutte le azioni necessarie per raggiungere gli obiettivi concordati. Ogni anno viene convocata la conferenza delle parti, numerata progressivamente di anno in anno; la più recente svoltasi in Egitto a Sharm el Sheik, la COP27⁴⁴, che ha definito degli obiettivi e delle modalità di raggiungimento sempre più definite, in modo da rendere plausibili il raggiungimento dell'aumento massimo del riscaldamento globale sotto i 2°C, rispetto alla temperatura media preindustriale. I 193 paesi aderenti alle Nazioni Unite hanno concordato una serie di obiettivi per consentire a tutti uno sviluppo sostenibile sia economicamente che ambientalmente, e li ha inseriti nell'Agenda 2030, che si è avviata dall'inizio del 2016 ed impegnerà le nazioni fino al 2030. Tale accordo consta di 17 obiettivi negli ambiti più diversi, di interesse sociale, economico, ambientale, energetico e della qualità della vita in generale:

⁴³ "United Nations Framework Convention on Climate Change", Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici

⁴⁴ Conference of Parties

1. Porre fine ad ogni forma di povertà nel mondo;
2. Porre fine alla fame, raggiungere la sicurezza alimentare, migliorare la nutrizione e promuovere un'agricoltura sostenibile;
3. Assicurare la salute e il benessere per tutti e per tutte le età;
4. Fornire un'educazione di qualità, equa ed inclusiva, e opportunità di apprendimento per tutti;
5. Raggiungere l'uguaglianza di genere ed emancipare tutte le donne e le ragazze;
6. Garantire a tutti la disponibilità e la gestione sostenibile dell'acqua e delle strutture igienico-sanitarie;
7. Assicurare a tutti l'accesso a sistemi di energia economici, affidabili, sostenibili e moderni;
8. Incentivare una crescita economica duratura, inclusiva e sostenibile, un'occupazione piena e produttiva ed un lavoro dignitoso per tutti;
9. Costruire un'infrastruttura resiliente e promuovere l'innovazione ed una industrializzazione equa, responsabile e sostenibile;
10. Ridurre l'ineguaglianza all'interno di e fra le Nazioni;
11. Rendere le città e gli insediamenti umani inclusivi, sicuri, duraturi e sostenibili;
12. Garantire modelli sostenibili di produzione e di consumo;
13. Promuovere azioni, a tutti i livelli, per combattere il cambiamento climatico;
14. Conservare e utilizzare in modo durevole gli oceani, i mari e le risorse marine per uno sviluppo sostenibile;
15. Proteggere, ripristinare e favorire un uso sostenibile dell'ecosistema terrestre;
16. pace, giustizia e istituzioni solide;
17. Rafforzare i mezzi di attuazione e rinnovare il partenariato mondiale per lo sviluppo sostenibile. (NAZIONI UNITE)

L'accesso all'energia è cruciale per il conseguimento di tutti gli obiettivi dell'Agenda 2030, e su questa base ci sarà sempre bisogno di soddisfare una sempre

maggior richiesta di energia. Chiaramente ogni obiettivo non deve essere in contrasto con gli altri; quindi, anche la produzione di energia deve fare un salto di qualità orientando la tecnologia verso le fonti rinnovabili e quelle a basse emissioni di gas effetto serra.

Il parlamento Europeo, nel 2019, ha sottoscritto un patto comune chiamato *Green Deal* che, attraverso delle tappe forzate e vincolanti per i Paesi membri, porti l'Unione Europea ad essere traino ed esempio al mondo come società ed economia sostenibile. Per fare ciò, ha evidenziato diversi punti necessari a combattere l'emergenza climatica anche passando da riforme sociali, economiche e cambiamenti di comportamento, mettendo al centro di ogni decisione l'ambiente ed il clima. Con questo documento, i Paesi membri dell'Unione Europea si vincolano con dei parametri che sposano, e vanno addirittura oltre, a quelli decisi con la UNFCCC durante le assemblee delle COP. Il *Green Deal* vincola i Paesi europei a un abbattimento entro il 2030 del 55% di gas serra GHG rispetto ai livelli misurati nel 1990, prima della conferenza di Rio de Janeiro, e alla neutralità climatica entro il 2050.

Per mitigare gli effetti della pandemia e rafforzare le azioni dell'Agenda 2030, l'Unione Europea ha deciso di dare uno shock positivo alle economie dei Paesi aderenti, decidendo un piano di interventi senza precedenti, che non risultassero semplici aiuti alle aziende ed ai cittadini, ma che avessero come fine ultimo non solo la modernizzazione dell'Europa, ma anche imponesse obiettivi ambiziosi per il raggiungimento dell'azzeramento delle emissioni nocive all'ambiente, ormai consapevole che non c'è più tempo da perdere. Per fare questo, la Commissione Europea ha attivato, insieme al piano QFP (Quadro Finanziario Pluriennale 2021-2027), il dispositivo *NextGenerationEU* (NGEU), per consentire all'UE di uscire dalla crisi più forte e resiliente, in grado cioè di affrontare le sfide mondiali attuali e rafforzare la società. L'Unione Europea non può essere solo un rapporto dare e avere, ma una Comunità che trae forza dalla stabilità e robustezza di tutti i suoi appartenenti, nella convinzione che uniti si è più forti che non divisi. Per finanziare il NGEU, la Commissione Europea ha raccolto fondi tramite prestiti nel mercato, emettendo obbligazioni in nome dell'UE; con i 1210,9 miliardi di euro del QFP, ed altri 806,9 del *NextGenerationEU*, è più grande pacchetto di misure stanziato in

UE. Entrato in vigore il 19 febbraio 2021, NGEU si concluderà nel 2026 e destinerà i fondi concordati con le Nazioni che hanno presentato il proprio PNRR (Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza); i fondi saranno erogati solo al raggiungimento degli obiettivi proposti, e dovranno interessare almeno per il 37% misure per l'ambiente e contro i cambiamenti climatici, ed almeno il 20% per l'evoluzione digitale. Due volte l'anno, i governi possono richiedere il versamento di una quota, in base ai progetti conclusi e verificabili. Al centro del *NextGenerationEU*, che persegue l'obiettivo di promuovere, in tutte le Nazioni UE, Internet veloce, la tutela dell'ambiente, il risparmio energetico, la formazione e l'educazione, un'amministrazione pubblica più efficiente, sviluppo di nuove tecnologie ed energie a basso o nullo impatto ambientale, c'è il dispositivo temporaneo RRF (*Recovery and Resilience Facility*). Il RRF è il cardine del NGEU poiché ha il compito di raccogliere i fondi necessari nel mercato finanziario, e renderli disponibili alle Nazioni che hanno pattuito il completamento dei progetti concordati entro il 2026.

Le criticità del settore energetico, messo in difficoltà per gli approvvigionamenti dal conflitto Russia-Ucraina, è stato affrontato con il piano *REPowerEU*, che prende atto dell'inaffidabilità della Russia per le forniture di gas, petrolio e carbone, e prevede di finanziare il risparmio energetico, la diversificazione delle fonti preferendo quelle a basse o nulle emissioni, e stipulando accordi con partner extraeuropei per la fornitura delle materie prime, per avere al più presto un sistema energetico più resiliente, stabile ed ecologico.

Per definire quali sono i progetti inseribili nei PNRR delle Nazioni europee, il Comitato Economico e Sociale Europeo (CESE) ha predisposto un sistema di classificazione denominato "Tassonomia Europea per la Finanza Sostenibile"; si tratta di un elenco che definisce dettagliatamente quali sono le attività economiche eco-sostenibili, realisticamente realizzabili, e che riscuotano la fiducia nei mercati finanziari, consentendo l'accesso privilegiato a finanziamenti pubblici e privati. Con questo elenco si vuole anche evitare il cosiddetto fenomeno del *green washing*, cioè, finanziare progetti che sono solo di facciata per le società grandi emettitrici di GHG, e che non portano nessun reale vantaggio all'ecologia. Principio fondamentale per l'inclusione nella Tassonomia è il *Do Not Significant Harm*

(DNSH), cioè per accedere ai finanziamenti del RRF si devono perseguire i 6 obiettivi ambientali pubblicati nella Gazzetta ufficiale dell'Unione Europea (*Regulation (EU) 2020/852*):

- a) la mitigazione dei cambiamenti climatici;
- b) l'adattamento ai cambiamenti climatici;
- c) l'uso sostenibile e la protezione delle acque e delle risorse marine;
- d) la transizione verso un'economia circolare;
- e) la prevenzione e la riduzione dell'inquinamento;
- f) la protezione e il ripristino della biodiversità e degli ecosistemi.

Le fonti energetiche rinnovabili, come l'eolico, il fotovoltaico e l'idroelettrico sono state subito inserite nella tassonomia in quanto rientranti nei parametri stabiliti, ma non è stato così semplice per il gas ed il nucleare. Il report pubblicato a giugno 2019 da parte del *Technical Expert Group on Sustainable Finance* (TEG), gruppo di esperti tecnici che supportano la Commissione Europea nelle decisioni finanziarie, riconosce come effettivamente il nucleare abbia emissioni GHG quasi zero, paragonabile all'eolico e all'idroelettrico, sollevando però il dubbio che non risponda al criterio DNSH, e ne raccomanda quindi un approfondimento da parte di tecnici esperti della tecnologia in questione.

A questo punto è stato incaricato un organismo tecnico, il *Joint Research Centre* (JRC), formato da scienziati indipendenti, avente base in 5 diversi stati Europei (tra cui l'Italia); le conclusioni a cui si arriva vengono espresse a marzo 2021 in un report⁴⁵ che sottolinea come non ci siano evidenze scientifiche che il nucleare sia più dannoso per le persone e l'ambiente più delle altre fonti energetiche già incluse nella Tassonomia. Secondo il criterio del DNSH, rileva che:

- le emissioni medie di gas serra nel LCA di un impianto di produzione di energia nucleare sono paragonabili ad un impianto idroelettrico o eolico;
- l'energia nucleare ha emissioni molto basse di ossidi di azoto (NOx), anidride solforosa (SO₂), particolato (PM) e composti organici volatili non metanici (NMVOC), paragonabili al fotovoltaico ed eolico;

⁴⁵ European Commission, *Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')*, 2021

- riguardo all'acidificazione ed eutrofizzazione, l'energia nucleare è paragonabile o migliore rispetto al fotovoltaico ed eolico;
- anche riguardo ad altri tipi di inquinamento, il nucleare è paragonabile ad altre fonti rinnovabili a basse emissioni;
- l'uso di suolo è minore rispetto al solare fotovoltaico ed eolico;
- la gestione dei rifiuti a media e alta radioattività in depositi geologici è considerata sicura e adeguata.

Nei mesi successivi di aprile e giugno vengono richieste le revisioni del report di JRC ad altri due gruppi indipendenti di esperti, *Article 31*⁴⁶ e SCHEER⁴⁷ (*Scientific Committee on Health, Environmental and Emerging Risks*): entrambi i gruppi di lavoro hanno confermato quanto emerso dal report del JRC, anche se con qualche distinguo che richiedeva ulteriori approfondimenti. Successivamente la Commissione Europea nel febbraio 2022 ha approvato un documento nel quale inseriva l'energia nucleare nella Tassonomia EU che rispondesse però a uno dei tre seguenti parametri:

- riguardasse la ricerca, lo sviluppo o la realizzazione di impianti innovativi come la fusione, gli SMR e le centrali di GEN IV;
- la costruzione di nuovi impianti con le migliori tecnologie attuali che abbiano ottenuto il permesso entro il 2045;
- il prolungamento della vita operativa in sicurezza delle centrali nucleari (*Long Term Operation*), autorizzato entro il 2040 dagli enti competenti.

Il 14 giugno 2022 due commissioni parlamentari Europee, *Committee on Economic and Monetary Affairs* e *Committee on the Environment, Public Health and Food Safety*, espressero parere negativo e bocciarono l'atto delegato che venne ridiscusso dal Parlamento Europeo il 6 luglio 2022 ed approvato senza ulteriori opposizioni, ed è diventato operativo il 1° gennaio 2023.

Dopo un lungo iter di confronto, investigativo e decisionale il Parlamento Europeo ha approvato l'inclusione del nucleare e del gas (come soluzione temporanea e con emissioni di CO₂ limitate) nella Tassonomia per la Finanza Sostenibile.

⁴⁶ Comitato di EURATOM composto da esperti in protezione da radiazioni.

⁴⁷ Gruppo di scienziati che compongono il comitato scientifico a supporto della Commissione Europea.

3.2 Enti regolatori del nucleare

Numerosi sono gli enti che si occupano della gestione dell'energia nucleare; di seguito quelli più rilevanti per il panorama italiano ed europeo:

IAEA

Il primo atto politico che portò alla creazione di un'organizzazione internazionale per l'energia atomica fu il discorso del presidente degli Stati Uniti Dwight D. Eisenhower alla conferenza delle Nazioni Unite svoltasi a New York: racchiuso nello slogan "*Atoms for Peace*", il discorso pronunciato sottolineava come l'energia atomica fosse talmente rivoluzionaria e potente, che se usata solo per fini bellici, avrebbe portato l'umanità alla distruzione reciproca, mentre se usata per fini pacifici avrebbe garantito il benessere a tutta l'umanità.

Il cuore del pensiero del discorso fu:

"It is not enough to take this weapon out of the hands of the soldiers. It must be put into the hands of those who will know how to strip its military casing and adapt it to the arts of peace". (Mr. Dwight D. Eisenhower, 1953).

Con queste premesse proponeva che venisse istituita un'organizzazione internazionale come organo delle Nazioni Unite, alla quale dovevano appartenere Stati Uniti, Francia e Gran Bretagna, ma necessariamente anche l'Unione Sovietica; questo suo desiderio si realizzò e l'Unione Sovietica divenne uno dei 18 Paesi fondatori, come anche l'Italia, che attualmente è il sesto contributore dell'Agenzia, con il 4.8% del budget complessivo (MUR, Ministero dell'Università e della Ricerca). Ad oggi sono 176 gli Stati membri; la Repubblica Popolare Democratica di Corea, che aveva aderito alla IAEA nel 1974, ha ritirato la sua adesione nel 1994. L'istituzione della IAEA, *International Atomic Energy Agency*, risale al 29 luglio 1957, ed ha come obiettivi quanto riportato nell'articolo secondo dello statuto: "L'Agenzia cercherà di accelerare e ampliare il contributo dell'energia atomica alla pace, alla salute e alla prosperità in tutto il mondo. Provvede, per quanto è in suo potere, a che l'assistenza fornita da essa o su sua richiesta o sotto la sua supervisione o controllo non sia utilizzata in modo tale da promuovere alcuno scopo militare."

Nell'articolo tre l'Agenzia è autorizzata ad incoraggiare la ricerca e scambio di informazioni e materiali tra le Nazioni aderenti, mantenendo controllo e supervisione sul materiale fissile, sulle tecnologie necessarie e sulla formazione del personale addetto: in pratica tutto ciò che riguarda l'energia nucleare, dall'estrazione, alla custodia, alla compravendita di materiale fissile, tecnologie e informazioni è sotto la sua egida.

1. Incoraggiare e assistere la ricerca, lo sviluppo e l'applicazione pratica dell'energia atomica per usi pacifici in tutto il mondo; e, se richiesto, fungere da intermediario al fine di garantire la prestazione di servizi o la fornitura di materiali, attrezzature o strutture da parte di un membro dell'Agenzia per un altro; e per svolgere qualsiasi operazione o servizio utile alla ricerca, allo sviluppo o all'applicazione pratica dell'energia atomica per scopi pacifici;
2. Provvedere, in conformità al presente Statuto, a materiali, servizi, attrezzature e strutture per soddisfare le esigenze della ricerca, dello sviluppo e dell'applicazione pratica dell'energia atomica per scopi pacifici, compresa la produzione di energia elettrica, con la dovuta considerazione per i bisogni delle aree sottosviluppate del mondo;
3. Promuovere lo scambio di informazioni scientifiche e tecniche sugli usi pacifici dell'energia atomica;
4. Incoraggiare lo scambio e la formazione di scienziati ed esperti nel campo degli usi pacifici dell'energia atomica;
5. Stabilire e amministrare salvaguardie volte a garantire che materiali fissili speciali e altri materiali, servizi, attrezzature, strutture e informazioni messi a disposizione dall'Agenzia o su sua richiesta o sotto la sua supervisione o controllo non siano utilizzati in modo tale da favorire qualsiasi scopo militare; e ad applicare salvaguardie, su richiesta delle parti, a qualsiasi accordo bilaterale o multilaterale, o su richiesta di uno Stato, a qualsiasi attività di quello Stato nel campo dell'energia atomica;

6. Stabilire o adottare, in consultazione e, se del caso, in collaborazione con gli organi competenti delle Nazioni Unite e con le agenzie specializzate interessate, standard di sicurezza per la protezione della salute e la minimizzazione del pericolo per la vita e la proprietà (compresi tali standard per le condizioni di lavoro), e provvedere all'applicazione di tali norme alle proprie operazioni nonché alle operazioni che utilizzano materiali, servizi, attrezzature, strutture e informazioni messe a disposizione dall'Agenzia o su sua richiesta o sotto il suo controllo o supervisione; e di prevedere l'applicazione di tali norme, su richiesta delle parti, a operazioni nell'ambito di qualsiasi accordo bilaterale o multilaterale o, su richiesta di uno Stato, a qualsiasi attività di tale Stato nel settore dell'energia atomica;
7. Acquisire o stabilire strutture, impianti e attrezzature utili allo svolgimento delle sue funzioni autorizzate, qualora le strutture, gli impianti e le attrezzature altrimenti disponibili nell'area interessata siano inadeguati o disponibili solo a condizioni che ritenga insoddisfacenti.” (IAEA)

EURATOM

Nell'Europa post-bellica degli anni '50 gli Stati teatro della guerra si trovarono ad affrontare la ricostruzione dell'economia e delle infrastrutture; sei nazioni (Italia, Belgio, Francia, Lussemburgo, Paesi Bassi e Germania) istituirono nel luglio del 1952 la Comunità Europea del Carbone e dell'Acciaio (CECA): fu il primo mattone della futura Comunità Europea, in quanto fu la prima volta che degli Stati rinunciarono ad una parte di sovranità a favore di un gruppo. La carenza di energia portò successivamente a sottoscrivere due trattati nel 1957, che istituirono un mercato comune generalizzato (Comunità Economica Europea - CEE) e la Comunità Europea dell'Energia Atomica (l'EURATOM).

I trattati entrano in vigore il primo gennaio 1958. La CEE prevedeva l'istituzione di specifici organi e meccanismi decisionali, aperta agli altri Stati europei, in una formula di condivisione di idee, risorse, politiche agricole e doganali. Il trattato dell'EURATOM voleva affrontare esclusivamente lo sviluppo della scienza e delle tecnologie dell'energia atomica, rendendo condivisibili tra tutti gli Stati membri risorse, materie prime, informazioni, strategie, e garantendone il controllo affinché fossero usate esclusivamente per fini pacifici, condividendo in pieno i principi della nascente IAEA.

Per dare attuazione al Trattato EURATOM vennero istituite delle istituzioni che dovevano generare le prime disposizioni in applicazione del trattato stesso, nel campo del progresso dell'energia nucleare “(lo sviluppo delle ricerche, la diffusione delle cognizioni, la protezione sanitaria, gli investimenti, le imprese comuni, l'approvvigionamento, il controllo di sicurezza, il regime della proprietà, il mercato comune nucleare e le relazioni con l'esterno)” (EUR-Lex, 2007). EURATOM persegue le seguenti missioni:

- Sviluppo della ricerca e perseguimento della diffusione delle conoscenze tecniche; la Commissione pubblica periodicamente un elenco di questione scientifiche della ricerca nucleare, dove sono necessari ulteriori studi. Tramite il Centro Comune di Ricerca (CCR, o JRC) affronta ambiti diversi quali l'ambiente e la sicurezza alimentare, rende condivisibili i brevetti e le conoscenze tecniche agli Stati e alle Aziende pubbliche o private che ne facciano richiesta.
- Stabilire quali siano gli standard di sicurezza che devono essere uniformemente applicati e garantiti dagli Stati membri, con particolare riferimento alla protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori, alle applicazioni mediche, ai livelli ammissibili di contaminazioni radiologiche negli alimenti ed alla gestione, trattamento e smaltimento dei rifiuti radioattivi.
- Agevola l'influsso degli investimenti verso tutta la filiera industriale necessaria alla produzione di energia nucleare.

- Garantisce tramite l’Agenzia di approvvigionamento dell’EURATOM (ESA) l’accesso equo a tutti gli utilizzatori europei alle materie grezze radioattive (uranio naturale) e fissili (uranio arricchito e plutonio, ma non solo); l’ESA, godendo di personalità giuridica e autonomia finanziaria, può stipulare in autonomia contratti di fornitura di materiale nucleare entro i confini dell’Unione Europea (godendo di diritto di opzione conferitogli dal Trattato) e con fornitori extra-europei.
- Grazie al suo corpo di 300 ispettori, garantisce che le materie, tecnologie e risorse nucleari non vengano distolte dai fini pacifici ed utilizzate per altri scopi soprattutto quello militare; i controlli di sicurezza riguardano tutta la filiera tecnologiche dell’industria nucleare, gli enti e le persone, e le ispezioni vengono svolte in base alle garanzie esercitate dalla IAEA.
- Esercita il diritto di proprietà sulle materie fissili speciali, come plutonio ed uranio arricchito.
- Promuove il progresso dell’uso pacifico dell’energia nucleare collaborando con Paesi terzi e con organizzazioni internazionali come l’IAEA; ogni stato membro che intende stipulare accordi con Stati terzi deve darne comunicazione alla Commissione. EURATOM ha stipulato diversi accordi con enti e nazioni quali Stati Uniti, Australia e Canada.
- Allo scopo di promuovere la scienza e la conoscenza nucleare, l’EURATOM ha la possibilità di istituire delle imprese comuni come attività di laboratorio, ricerca e sviluppo; gli esempi più rappresentativi sono il reattore JET, il CERN (*Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*) e la partnership EURATOM-Giappone per la realizzazione dell’ITER.

EURATOM tramite il programma PHARE fornisce strumenti finanziari e tecnologici ai paesi candidati ad entrare nell’Unione europea, che soprattutto dopo il crollo dell’Unione Sovietica si sono trovati a dover gestire il loro parco nucleare; l’adesione ai vincoli imposti da EURATOM è considerato un requisito indispensabile per l’adesione all’Unione Europea.

Il documento di sintesi e di presentazione del Trattato EURATOM recita questa frase emblematica:

“La necessità di garantire la sicurezza dell’approvvigionamento energetico e le preoccupazioni suscitate dal cambiamento climatico si traducono in un interesse ancora maggiore per l’energia nucleare.” (EUR-Lex, 2007).

NEA

Un altro importante ente internazionale, istituito all’interno dell’OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico) è la *Nuclear Energy Agency* (NEA), agenzia intergovernativa che facilita la cooperazione tra i Paesi appartenenti (38 Nazioni tra cui l’Italia) nell’ambito dello sviluppo di tecnologie nucleari avanzate, della scienza, conoscenza e sicurezza, del diritto e dell’ambiente, sempre a scopi pacifici.

ENSREG

L’*European Nuclear Safety Regulations Group*, è l’ente della Commissione Europea, composto da alti funzionari in ambito di regolamentazione per la sicurezza nucleare, sicurezza dei rifiuti radioattivi o la protezione dalle radiazioni, che si occupa di aiutare le istituzioni europee nel miglioramento continuo della gestione del combustibile nucleare esaurito e dei rifiuti radioattivi. Si occupa inoltre di fornire informazioni relativamente al monitoraggio ambientale, alle prevenzioni degli incidenti e alle eventuali disposizioni di emergenza da attuare in caso di incidente nucleare.

ENEA

L'ENEA, Ente nazionale per la ricerca e lo sviluppo dell'energia nucleare e delle energie alternative, è un'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile (ENEA).

ENEA si occupa dei principali argomenti di innovazione tecnologica ed è suddivisa in quattro dipartimenti, ciascuno con la propria area di appartenenza: tecnologie energetiche e fonti rinnovabili (studia ed implementa sistemi di produzione ed accumulo di energia rinnovabile), sostenibilità dei sistemi produttivi e territoriali (sviluppo sistemi di produzione sostenibili), efficienza energetica (si occupa anche delle certificazioni per gli Ecobonus), fusione e tecnologie per la sicurezza nucleare.

E' dotata inoltre di tre unità programmatiche che svolgono compiti previsti dalla normativa o che eseguono attività di ricerca o di servizio; in particolare: l'Unità Antartide organizza e realizza campagne di studi nell'ambito del Programma Nazionale di Ricerche in Antartide; l'Istituto di Radioprotezione accorpa competenze e attività dell'ENEA in termini di sorveglianza fisica ed ambientale, radioprotezione, servizi di monitoraggio, taratura della strumentazione e dosimetria; l'Unità Studi, Analisi e Valutazioni si occupa dei temi dell'energia, dell'ambiente e dello sviluppo economico sostenibile.

Il Dipartimento Fusione e tecnologie per la Sicurezza Nucleare (FSN) è articolato in diverse aree di attività: Studi del Plasma e DTT (Divertor Tokamak Test facility) è l'unità che si occupa dello sviluppo teorico e ingegneristico a supporto della fusione nucleare; il suo gruppo scientifico coordina le partecipazioni ENEA alle attività di ricerca della fusione europei e internazionali come JET e ITER ma non solo. Nel centro di ricerca di Frascati da circa mezzo secolo si svolgono attività di ricerca che hanno prodotto risultati lusinghieri e rilevanti nel confinamento ad alto campo magnetico, riscaldamento e controllo dei plasmi e molto altro ancora. Anche l'unità Sviluppo Energia da Fusione si occupa di alcune aree di ricerca a supporto dei progetti sperimentali ITER, DTT, JET e DEMO. Altre unità operative si occupano di Ingegneria Sperimentale, Tecnologie Impianti e materiali per la fissione nucleare, Tecnologie fisiche per la Sicurezza e la Salute (sviluppo di tecnologie e sistemi di protezione e standard di sicurezza, sviluppo di macchine per radioterapia, diagnostica bio-medica), Metrologia delle Radiazioni Ionizzanti, Sicurezza e Sostenibilità del Nucleare, Tecnologie Fisiche conduttività, Progetti Innovativi, Supporto Tecnico-Strategico e Unità Tecnico-Gestionale.

In Italia, con un budget di poco più di 200 milioni di euro, l'ENEA è l'istituzione che svolge attività di ricerca, sviluppo e sperimentazioni in ambito di fissione e fusione tra le più avanzate, e assolve anche l'incarico di trasmetterle alle industrie del settore.

SOGIN S.p.A.

È la società costituita nel 1999 dall'Enel Spa per occuparsi del decommissioning delle nostre quattro centrali nucleari; un anno dopo è stata ceduta al Ministero del Tesoro, ora Ministero dell'Economia e delle Finanze. Nel 2001 riceve gli indirizzi strategico-operativi dal Ministro dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato (ora Ministro dello Sviluppo Economico), e da allora, oltre che dello smantellamento delle centrali elettronucleari tramite la controllata Nucleco S.p.A., si occupa di tutto il ciclo dei rifiuti radiologici della produzione di energia, dei siti e centri di ricerca non più operativi, e dei rifiuti provenienti dall'ambito diagnostico e medico, garantendone la sicurezza e l'isolamento. È incaricata inoltre della localizzazione, progettazione, costruzione e gestione del Deposito Nazionale, infrastruttura di superficie dove verranno conservati in modo definitivo ed in un'unica struttura tutti i rifiuti radioattivi.

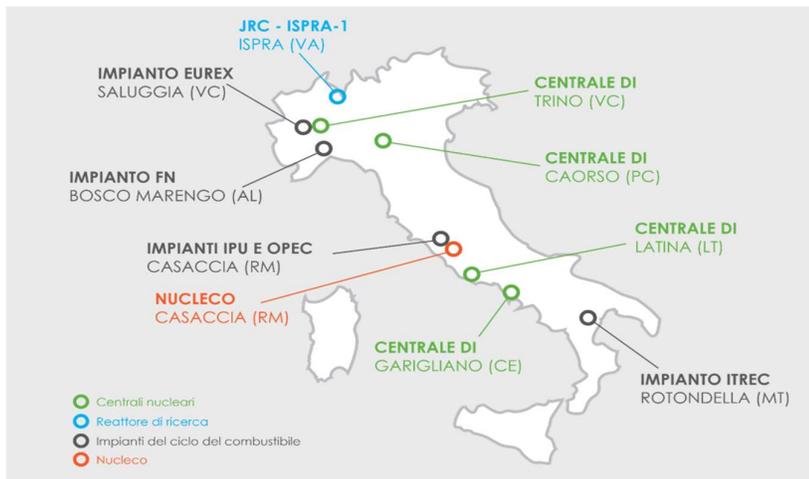


Figura 12: Impianti controllati da Sogin S.p.A. Fonte: Sogin S.p.A.

Coordina inoltre le attività previste all'interno del programma Global Partnership, occupandosi dello smantellamento dei vecchi sottomarini atomici russi.

ISIN

L'Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione, è l'Autorità di regolamentazione competente in materia di sicurezza nucleare e di radioprotezione; ha tra i propri compiti la vigilanza e controllo degli impianti nucleari non più operativi, del loro decommissioning, delle autorizzazioni e controllo degli impianti di ricerca e della gestione dei rifiuti nucleari; fornisce supporto tecnico al Governo ed agli Enti interessati relativamente al proprio ambito di responsabilità, e partecipa per conto dell'Italia alle collaborazioni con l'IAEA, la NEA, L'ENSREG e tutte le sessioni internazionali relative alla sicurezza e protezione relativa al nucleare.

3.3 Situazione legislativa in Italia

Durante gli anni '60 l'Italia è stata la terza Nazione per produzione di energia dal nucleare dopo Stati Uniti e Regno Unito. Ciò nonostante, l'energia prodotta ricopriva il 3-4% del consumo medio della rete, mentre principalmente venivano utilizzate centrali ad olio combustibile, materiale di scarto dal petrolio dopo la raffinazione della benzina. Tale materiale era altamente inquinante, ma la politica dell'epoca non imponeva grossi vincoli relativamente alle emissioni nell'ambiente. Nel 1973 scoppiò la crisi petrolifera che mise in luce quanto l'Italia dipendesse da pochi fornitori instabili politicamente; successivamente l'Enel propose la costruzione di dieci nuove centrali nucleari, per un totale di 20 mila MW, al Governo italiano, che nel 1975 approvò inserendo il progetto nel PEN (Piano Energetico Nazionale), facendo entrare il nucleare nel mix-energetico esistente insieme all'idroelettrico ed il geotermico.

In questo contesto si inseriscono i due Scandali dei Petroli, con la scoperta di un traffico illecito di petrolio e conseguente evasione fiscale, per un volume d'affari di migliaia di miliardi di Lire dell'epoca; le indagini scoprirono che parte di questi proventi finiva nelle tasche di alte cariche della Guardia di Finanza e di politici di primo piano, ed il 5% ad alcuni partiti, sembra con la richiesta di ostacolare la scelta del nucleare a favore del petrolio: grazie ad una tempestiva legge sul finanziamento ai partiti, tutte le accuse caddero.

Di seguito all'incidente di Three Mile Island del '79, l'opinione pubblica mondiale iniziava ad avere posizioni dubbiose in merito alla sicurezza che queste centrali offrivano, spinte anche dai movimenti ambientalisti che iniziarono delle campagne contro il nucleare. L'incidente di Chernobyl del 1986 determinò la promozione di tre quesiti, relativi a elementi marginali del programma nucleare italiano, nel referendum abrogativo del 1987, insieme ad altri due quesiti legati a tutt'altra questione:

- Abolizione delle norme, per stabilire una responsabilità civile per i magistrati;
- Abolizione della commissione inquirente e del trattamento dei reati ministeriali;
- Abolizione dell'intervento statale se il Comune non concede un sito per la costruzione di una centrale nucleare;
- Abolizione dei contributi di compensazione agli enti locali per la presenza sul proprio territorio di centrali nucleari o a carbone;
- Esclusione della possibilità per l'Enel di partecipare alla costruzione di centrali nucleari all'estero.

Vinse il Sì su tutti e cinque i quesiti; visto quindi l'andamento dell'opinione pubblica in merito al nucleare, i successivi Presidenti del Consiglio Gorla, De Mita e Andreotti VI, imposero l'abbandono del Progetto Unificato Nucleare, e lo spegnimento definitivo delle centrali elettronucleari sul suolo italiano.

I siti in costruzione furono riutilizzati per la costruzione di centrali termoelettriche, mentre gli studi e la sperimentazione nelle Università e nei laboratori di ricerca ha continuato a produrre innovazione e collaborazioni con progetti atomici all'estero. Per tornare a parlare di energia elettrica dal nucleare si dovrà aspettare un'altra impennata di prezzi del petrolio e gas naturale tra il 2005 e il 2008. Nuovo impulso al nucleare venne dato dal Governo Berlusconi IV, che inserì nella Legge 19/33/2008 un intero articolo dedicato all'energia:

Art. 7.

“Strategia energetica nazionale

1. Entro sei mesi dalla data di entrata in vigore del presente decreto, il Consiglio dei ministri, su proposta del Ministro dello sviluppo economico, definisce la «Strategia energetica nazionale», che indica le priorità per il breve ed il lungo periodo e reca la determinazione delle misure necessarie per conseguire, anche attraverso meccanismi di mercato, i seguenti obiettivi:

- a) diversificazione delle fonti di energia e delle aree geografiche di approvvigionamento;
- b) miglioramento della competitività del sistema energetico nazionale e sviluppo delle infrastrutture nella prospettiva del mercato interno europeo;
- c) promozione delle fonti rinnovabili di energia e dell'efficienza energetica;
- d) realizzazione nel territorio nazionale di impianti di produzione di energia nucleare;
- d-bis) promozione della ricerca sul nucleare di quarta generazione o da fusione;
- e) incremento degli investimenti in ricerca e sviluppo nel settore energetico e partecipazione ad accordi internazionali di cooperazione tecnologica;
- f) sostenibilità ambientale nella produzione e negli usi dell'energia, anche ai fini della riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra;
- g) garanzia di adeguati livelli di protezione sanitaria della popolazione e dei lavoratori.

2. Ai fini della elaborazione della proposta di cui al comma 1, il Ministro dello sviluppo economico convoca, d'intesa con il Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare, una Conferenza nazionale dell'energia e dell'ambiente.

4. Dall'attuazione del presente articolo non devono derivare nuovi o maggiori oneri a carico della finanza pubblica.” (PARLAMENTO)

Il governo Berlusconi IV (2008-2011), dopo l'approvazione della legge delega 99 del 23 luglio 2009, che consentiva la costruzione di centrali nucleari nel territorio italiano, iniziò una serie di contatti con Francia e Stati Uniti per siglare accordi di collaborazione industriale sul nucleare civile. L'ENEL entrò in una joint-venture con la francese EDF al 50% per la costruzione di almeno quattro reattori nucleari di GEN III entro il 2020; successivamente, il Governo stipulò accordi simili anche con gli Stati Uniti, per una partnership tra Westinghouse⁴⁸ e Ansaldo Nucleare⁴⁹. L'allora Ministro dello Sviluppo Economico Claudio Scajola propose di arrivare a dieci nuovi reattori e produrre almeno il 25% del fabbisogno energetico con il nucleare, ed un altro 25% con altre fonti rinnovabili, allo scopo di ridurre la dipendenza energetica dall'estero e tagliare le emissioni di gas serra. Venne poi approvato anche il decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31 che definì l'esigenza e le modalità relative alla costruzione del Deposito Nazionale, unitamente ad un Parco Tecnologico, le modalità di gestione dei rifiuti e i rimborsi compensativi alle popolazioni interessate. Inoltre, fu definito un programma di informazione nazionale nell'ambito della produzione di energia elettrica dal nucleare, per fornire gli strumenti conoscitivi alla popolazione relativamente a questa tecnologia, e contemporaneamente si richiedeva l'identificazione dei possibili siti dove allocare le nuove centrali nucleari. A questa legge si opposero alcune Regioni, contestando di essere state escluse dal processo decisionale. Il partito politico Italia dei Valori presentò ad aprile 2010 una proposta di referendum per abrogare alcune delle norme cardine del nuovo programma nucleare; venne aggiunto ad inizio marzo 2011 ad altri quesiti nel referendum abrogativo e calendarizzato al 12 e 13 giugno dello stesso anno. L'incidente di Fukushima Dai-ichi dell'11 marzo determinò nella pubblica opinione un'ulteriore ondata di sdegno, che spinse il Governo ad emanare il decreto-legge 34/2011 con il quale imponeva una moratoria di 12 mesi per il referendum sul nucleare, per consentire l'acquisizione di ulteriori evidenze scientifiche, sia relativamente all'incidente che ai profili di sicurezza che gli impianti nucleari moderni consentono.

⁴⁸ Multinazionale che si occupa della costruzione di impianti nucleari.

⁴⁹ Azienda italiana che opera nel settore nucleare e realizza centrali nucleari di terza generazione raffreddate ad acqua

Tuttavia, la Corte di Cassazione il primo giugno confermò i referendum, che riguardavano:

- Modalità di affidamento e gestione dei servizi pubblici locali di rilevanza economica;
- Determinazione della tariffa del servizio idrico integrato in base all'adeguata remunerazione del capitale investito;
- Abrogazione delle nuove norme che consentono la produzione nel territorio nazionale di energia elettrica nucleare;
- Abrogazione di norme della legge 7 aprile 2010, n. 51, in materia di legittimo impedimento del Presidente del Consiglio dei ministri e dei Ministri a comparire in udienza penale.

Essendo stati caricati di valenza politica, in quanto riguardavano gli interessi del Presidente del Consiglio in carica, e con l'opinione pubblica nuovamente impaurita da quanto successo in Giappone, i Sì vinsero nuovamente, decretando la fine del secondo Programma Nucleare italiano.

Con l'avvento della crisi energetica conseguente all'invasione russa dell'Ucraina nel febbraio 2022, nuovamente i prezzi dell'energia sono schizzati alle stelle, in quanto l'Europa importava oltre il 30% del gas dalla Russia ad inizio della guerra, ed il prezzo del gas è legato a doppio filo al prezzo dell'elettricità. Ora questa dipendenza si è ridimensionata all'8% circa, sia grazie alla diversificazione delle fonti di approvvigionamento, ma anche alle rinnovabili.

In una nota congiunta di maggio 2023, il Ministro e il Viceministro dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica, Gilberto Pichetto e Vannia Gava, hanno ringraziato il Parlamento per aver affrontato il confronto sul nucleare, ed aver quindi fornito al Governo il mandato di esplorare anche con gli altri Stati Europei la possibilità di inserire l'energia dall'atomo nel mix energetico italiano.

Le esigenze di stabilità della rete, l'indipendenza dai fornitori esteri, i costi della materia prima, e non ultimo l'inserimento nella Tassonomia europea, hanno rimesso l'energia nucleare al centro del dibattito politico e sociale italiano; il nuovo Governo di centrodestra a guida Giorgia Meloni, insieme alla coalizione Azione-Italia Viva, nel proprio programma elettorale hanno rimosso nuovamente il tabù al nucleare come soluzione ai problemi energetici per l'Italia e l'Europa.

L'Italia si trova attualmente impreparata ad affrontare gli argomenti posti dalla *Green Economy* in quanto ha una normativa sfilacciata ed emergenziale, sia per l'eventuale decisione che un domani potrebbe adottare con l'inserimento del nucleare nel mix-energetico, ma anche per l'annoso problema mai risolto dell'individuazione del sito, costruzione e gestione del Deposito Nazionale di stoccaggio dei rifiuti radioattivi ed il *decommissioning* delle centrali nucleari spente all'indomani del referendum del 1987.

Il problema più grande (forse) per l'Italia sarà la gestione del dibattito pubblico, necessario per riportare sul piano della consapevolezza le importanti decisioni che non sono più procrastinabili, svincolandole dalle scelte di campo imposte dagli schieramenti politici e ideologici, che ormai polarizzano qualsiasi argomento su posizioni contrapposte, poco inclini al compromesso.

3.4 Francia e Germania: due scelte agli antipodi

Il diritto dell'energia coinvolge diversi ambiti di interesse dei cittadini, che ne devono avere accesso ad un prezzo accettabile, per garantire il proprio progresso umano e sociale e la propria dignità, non rinunciando però a poter vivere in un ambiente sano.

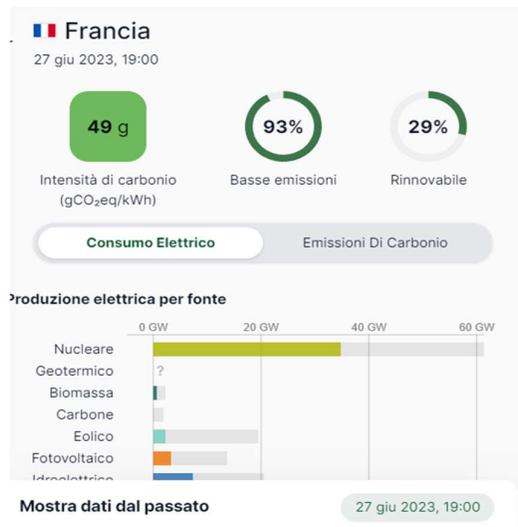
Per raggiungere questi diversi obiettivi, la Francia si è dotata di una serie di normative che rispettano due pilastri fondamentali: il diritto di partecipazione dei cittadini, ed il dovere di informazione da parte delle istituzioni. Questi due semplici principi basilari consentono di superare il naturale scetticismo, quando non addirittura paura, riguardo la tecnologia nucleare.

Nell'esperienza francese, esempio in Europa di accettazione del nucleare con circa il 70% del proprio fabbisogno energetico prodotto dall'atomo, il dibattito pubblico, la trasparenza nel fornire informazioni corrette e complete da parte degli enti pubblici, la possibilità da parte del cittadino di contribuire alla decisione, sono dei passaggi fondamentali per evitare l'effetto NIMBY ed arrivare congiuntamente a dei compromessi accettabili da tutte le parti.

La Francia si è dotata, dal 2006, di una legislazione organica in materia di nucleare, inserita nel codice per l'ambiente e non nel codice per l'energia, questo per sancire come al centro della legge ci sia l'uomo e l'ambiente che lo circonda, pur comprendendo normative che normalmente competono alla sfera del diritto del lavoro, diritto alla salute, diritto economico.

EURATOM, con la direttiva europea 70 del 2011, ha richiesto ai paesi europei di dotarsi di siti di stoccaggio di rifiuti radioattivi ed eventuale materiale da fissione esausto nel proprio territorio. La Francia ha provveduto con la creazione di un sito geologico, chiamato Cigéo (*Centre Industriel de stockage Géologique*), che sarà aperto presumibilmente entro il 2025, dove verranno conservati i rifiuti ad alta e media intensità e lunga vita già prodotti nel territorio francese, e quelli che saranno prodotti nei prossimi cent'anni. Assicurare quindi la democrazia partecipativa ottiene come risultato apprezzabile un benessere psicologico e sociale della cittadinanza che si sente garantita nel suo "diritto di essere ascoltati", di prendere in coscienza una decisione consapevole delle conseguenze, nel bene e nel male, e da questo ne deriva che le scelte difficili vengono comunque prese nell'interesse comune.

La formula che governa questo modo di gestire il dibattito pubblico come scelta consapevole è racchiuso in questo concetto espresso nel libro di Colella: “*Il diritto dell’energia nucleare risulta essere il risultato di costanti preoccupazioni, di valutazioni strategiche tra diverse esigenze e molteplici interessi che vanno costantemente conciliati e bilanciati, nel tempo e nello spazio, e che impongono all’autorità statale di adottare quelle scelte politiche pubbliche e quegli atti normativi più appropriati nell’interesse generale della collettività*”⁵⁰. Grazie al suo



mix-energetico, la Francia è uno dei Paesi europei con economia sviluppata ad avere il minor tasso di emissioni di CO₂ e gas serra.

Figura 13: fonte: Electricity maps

La Germania ha avuto nell’arco di più di sessant’anni 35 centrali nucleari, e si è strutturata anche per la gestione del Nuclear Waste con ben 3 siti di stoccaggio. Riguardo al mix-energetico, ha fatto una scelta molto diversa rispetto alla Francia, sulla scia emotiva dell’incidente di Fukushima, decidendo lo spegnimento di tutte le centrali nucleari nel proprio territorio, e puntando temporaneamente alla produzione di energia con gas e carbone, nell’attesa di portare la produzione di energia da fonti rinnovabili, come solare ed eolico, dal 52% all’ 80% entro il 2030; chiaramente si tratta di percentuali di punta, ma sappiamo bene che le rinnovabili fotovoltaico ed eolico hanno una Capacity Factor relativamente bassa, e non sono in grado di garantire il carico base.

L. COLELLA, Il diritto dell’energia nucleare in Italia e in Francia Profili comparati della governance dei rifiuti radioattivi tra ambiente, democrazia e partecipazione, op. cit., p. 77

Quindi, senza un sistema di accumulo immenso, l'utilizzo di gas e carbone probabilmente resterà comunque molto alto. Questa decisione è stata prevalentemente voluta ed imposta dal Partito dei Verdi, da alcuni anni molto influente, tanto da imporre delle scelte ai governi tedeschi che si sono succeduti in cambio dell'appoggio politico. Una parte importante della popolazione tedesca si è



Figura 14: fonte: Electricity maps

detta però contraria a questa operazione, in quanto comporterà un incremento delle emissioni di GHG nell'ordine di milioni di tonnellate.

La Germania ha fatto una scelta, speriamo non irreversibile: un domani per mutate esigenze o volontà o possibilità di accesso a nuove tecnologie, potrebbero decidere di valutare il ripristino del nucleare nel loro mix-energetico.

L'incidente di Fukushima ha avuto degli strascichi nei programmi nucleari di diversi Paesi; il Giappone all'indomani dell'incidente ha deciso di spegnere i propri reattori nucleari, per effettuare delle verifiche di sicurezza. A partire da agosto 2015 ha iniziato ad accenderne alcuni e a costruirne di nuovi. A febbraio 2023 il Giappone conta 33 reattori operativi, e 2 in costruzione.

L'obiettivo dichiarato dal Governo è di arrivare a produrre il 20 - 22% del fabbisogno energetico dal nucleare entro il 2030, quando prima del 2011 ne produce il 30%.

L'atteggiamento della popolazione dopo l'incidente di Fukushima è un po' cambiato e c'è una parte della popolazione che si dice contraria allo sviluppo del programma nucleare in Giappone. Ma, visto la dipendenza che il Giappone ha verso i fornitori di gas, in particolare la Russia, oltre alle rinnovabili il Governo attuale considera il nucleare una risorsa fondamentale nel mix-energetico.

Ù

CONCLUSIONI

Quando ho comunicato ai miei familiari ed ai miei amici l'argomento che ho scelto per la mia tesi, ho suscitato non poche perplessità: il nucleare, come pochi altri argomenti, divide le opinioni in pro e contro, senza tonalità di grigio. O lo ami, o lo odi. Ma ritengo, con questa ricerca, di aver dato al lettore la possibilità di farsi un'opinione basata sulla conoscenza di molteplici fattori, con dati ufficiali, con prospettive diverse, e non solo per il nucleare.

Il fabbisogno di energia:

- Il progresso dell'uomo necessita di energia, e questo vale tanto per le economie avanzate quanto per quelle emergenti; non possiamo però più permetterci di trascurare tutto il resto, immolando l'intero ambiente a questo fine.

L'ambiente al centro del cambiamento:

- Gli obiettivi che l'Europa ed il mondo si sono dati siano perlomeno un buon inizio, e che siamo chiamati tutti a fare del nostro meglio, uno sforzo che ci consenta di cambiare la sorte che ci stiamo scegliendo. Mettendo al centro della nostra attenzione l'ambiente, si acquisisce una prospettiva che non si pensava di poter avere.

Impatto positivo sull'economia:

- Gli enormi stanziamenti di denaro che le Nazioni stanno investendo nel cambio di rotta verso le fonti energetiche rinnovabili, fino a qualche anno fa sembravano insostenibili, mentre ora invece sono il perno per un rinnovamento industriale ed economico importante.

Nucleare a basse emissioni e fautore di resilienza:

- Il nucleare è inserito di diritto in questo contesto, in quanto tecnologia che già da ora produce elevate quantità di energia da pochi grammi di materiale, con un elevato standard di sicurezza che ne rende accettabile il rischio, con forniture di "combustibile" che non sono appannaggio di pochi riottosi Stati (e che quindi non crea dipendenze), con un futuro ancora tutto da scrivere, ma che per ora promette bene, come dichiarano i numerosi Enti che studiano e controllano quanto concerne l'atomo.

Nuova recente apertura dell'Italia al nucleare:

- L'Italia sta di nuovo considerando un ritorno al nucleare, il più moderno possibile, da inserire nel mix energetico necessario al proprio fabbisogno; è importante costruire però un terreno comune di confronto tra le diverse opinioni, per gettare le basi di una scelta consapevole che coinvolgerà tutti noi e le generazioni a venire per molto tempo.

Cambiare le regole del gioco:

- Ora che le tecnologie ci offrono la possibilità di mantenere uno standard di vita elevato riducendo l'impatto ambientale, è necessario dotarsi di leggi e regolamenti che governino il cambiamento, che ci guidino nella sfida più grande che l'uomo abbia mai affrontato.

BIBLIOGRAFIA

'Atoms for Peace: An Analysis After Thirty Years', (PILAT, J.F., PENDLEY, R.E., EBINGER, C.K., Eds), Westview Press, Boulder, CO (1985) Appendix C, pp. 283–291.

'Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources', UNECE, 2021

'Chernobyl's Legacy: Health, Environmental and Socio-Economic Impacts and Recommendations to the Governments of Belarus, the Russian Federation and Ukraine', IAEA, WHO, UNDP, FAO, UNEP, UN-OCHA, UNSCEAR, WORLD BANK GROUP, The Chernobyl Forum: 2003-2005 second revised version

'Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources', World Nuclear Association (WNA), luglio 2011

'DE PROFUNDIS SUL NUCLEARE: LE LEZIONI PER IL FUTURO (E COSA RIMANE IN PIEDI)' Costantino F., AIC (Associazione Italiana dei Costituzionalisti) rivista n° 3/2011, 26 luglio 2011

'DIRETTIVA 2013/51/EURATOM DEL CONSIGLIO del 22 ottobre 2013 che stabilisce requisiti per la tutela della salute della popolazione relativamente alle sostanze radioattive presenti nelle acque destinate al consumo umano', Gazzetta ufficiale dell'Unione europea, 7 novembre 2013

'DISSALAZIONE NUCLEARE' Ordine degli ingegneri della Provincia di Roma, s.n.

'Electricity Market Report 2023' IEA, 2023

'Energia nucleare, ambiente e democrazia: Italia e Francia a confronto', Pepe V. federalismi.it, Rivista di diritti pubblico italiano, comparato, europeo, 29 gennaio 2019

'Final Report Cost of Energy (LCOE) Energy costs, taxes and the impact of government interventions on investments' European Commission, ottobre 2020

'Guidance on development costs and the nuclear Regulated Asset Base model',
Department for Business, Energy & Industrial Strategy, novembre 2022
'Guidance on Recovery and Resilience Plans in the context of REPowerEU'
Commission Notice, s.n.

'How to Know if and When it's Time to Commission a Life Cycle Assessment',
International Council of Chemical Associations, Responsible Care, s.n.

'Il decommissioning nucleare, il deposito nazionale dei rifiuti radioattivi e la centrale di Latina' Camera dei deputati, Servizio Studi, Dossier n° 113 - Missione delle Commissioni riunite VIII e X , 14 aprile 2014

'Il rapporto del Chernobyl Forum ', Batistoni P., ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleare, s.d.

'Indicatore Level(s) 1.2: Potenziale di riscaldamento globale (GWP) del ciclo di vita'
Dodd N., Donatello S., Cordella M., JRC TECHNICAL REPORTS, European Commission, gennaio 2021

'INES, The international nuclear and radiological event scale', IAEA (International Atomic energy Agency), OECD (Nuclear Energy Agency), s.d.

'L'avvocato dell'atomo: in difesa dell'energia nucleare' Romano L., L'edizione. Le terre 264. Roma: Fazi editore, 2022.

'La politica energetica nucleare in Italia' Carletti M., LUISS Guido Carli libera università internazionale degli studi sociali, 2020 2019.

'L'accettazione sociale del nucleare', G. Buceti, S. Del Bufalo, L. Moretti, D.

Fioravante, E. Pasta, Enea Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie,
l'Energia e lo sviluppo economico sostenibili, settembre 2010

'Life Cycle Assessment of Electricity Generation Options', United Nations Economic
Commission for Europe (UNECE), 2021

'Long-Term Operation of Nuclear Power Plants and Decarbonisation Strategies',
OECD, NEA, Nuclear Technology Development and Economics 2021

*'MISSION REPORT THE GREAT EAST JAPAN EARTHQUAKE EXPERT MISSION
IAEA INTERNATIONAL FACT-FINDING EXPERT MISSION OF THE FUKUSHIMA
DAI-ICHI NPP ACCIDENT FOLLOWING THE GREAT EAST JAPAN
EARTHQUAKE AND TSUNAMI Tokyo, Fukushima Daiichi NPP, Fukushima Dai-
ni NPP and Tokai Dai-
ni NPP, Japan'* IAE (International Atomic Energy Agency), 2
May-2 June 2011

*'Nuclear Non-Proliferation, Congress and the Control of Peaceful Nuclear
Activities'* BECKMANN, R.L., p. 70

*'Nuclear Power and Secure Energy Transitions From today's challenges to tomorrow's
clean energy systems'* IEA, giugno 2022

'Nuclear Power in a Clean Energy System', IEA, maggio 2019

'Projected Costs of Generating Electricity', IEA, NEA, 2020

'RADIAZIONI IONIZZANTI. Origine, prevenzione dai rischi e impieghi', ISPRA, s.n.

'Rassegna bibliografica di studi LCA per i sistemi di produzione di energia elettrica',
Notarnicola B., settembre 2022

'REGULATIONS, COMMISSION DELEGATED REGULATION (EU) 2022/1214 of 9

March 2022 amending Delegated Regulation (EU) 2021/2139 as regards economic activities in certain energy sectors and Delegated Regulation (EU) 2021/2178 as regards specific public disclosures for those economic activities, Official Journal of the European Union, 15 luglio 2022

'Report on the President's on the accident at Three Mile Island', J.G. Kemeny, U. S. Government Printing Office, Washington, 1979.

'Risk assessment review group report to the U.S. nuclear regulatory commission', H.W. Lewis, Chairman Prepared for U.S. Regulatory Commission, 16 October 1978

'Social acceptance of renewable energy innovation: An introduction to the concept Energy Policy' Rolf Wüstenhagen, Maarten Wolsink, Mary Jean Bürer, Volume 35 Issue 5, maggio 2007, Pages 2683- 2691

'Technical assessment of nuclear energy with respect to the 'do no significant harm' criteria of Regulation (EU) 2020/852 ('Taxonomy Regulation')' Abousahl, S., Carbol, P., Farrar, B., Gerbelova, H., Konings, R., Lubomirova, K., Martin Ramos, M., Matuzas, V., Nilsson, K., Peerani, P., Peinador Veira, M., Rondinella, V., Van Kalleveen, A., Van Winckel, S., Vegh, J., Wastin, F. , JRC Science for Policy Report, European Commission, 2021

'The Fukushima Daiichi Accident', Internationale Atomenergie-Organisation, a c. di. STI/PUB. Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2015.

'Three Miles Island Accident', United States Nuclear Regulatory Commission, Background Office of Public Affairs, aprile 2022.

'Un nuovo diritto per il nucleare. Una prima lettura del d. lgs. 31/2010', Ammannati L., De Focatiis M., s.n.

*'VERSIONE CONSOLIDATA DEL TRATTATO CHE ISTITUISCE LA COMUNITÀ
EUROPEA DELL'ENERGIA ATOMICA (2010/C 84/01)' Gazzetta ufficiale dell'Unione
europea, 30 marzo 2010*

SITOGRAFIA

‘*About NRC*’, NRC Web <<https://www.nrc.gov/about-nrc.html>> [ultimo accesso 17 Maggio 2023]

‘*ACPI00*’, CNNC <https://en.cnn.com.cn/2019-11/22/c_426400.htm> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Agenda 2030 per lo sviluppo sostenibile*’, Agenzia per la Coesione Territoriale <<https://www.agenziacoesione.gov.it/comunicazione/agenda-2030-per-lo-sviluppo-sostenibile/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Akademik Lomonosov, Floating Nuclear power Plant*’, Rosatom, 2022 <<https://fnpp.info/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Ammoniaca verde: un gas per la transizione ecologica?*’, Marzia Campioni, scienza in rete, 31 agosto 2022 <<https://www.scienzainrete.it/articolo/ammoniaca-verde-gas-transizione-ecologica/marzia-campioni/2022-08-31>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Atomi per la pace*’, Wikipedia, 2023 <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Atomi_per_la_pace&oldid=133460806> [ultimo accesso 17 Maggio 2023]

‘*Atoms for Peace Speech*’, IAEA, <<https://www.iaea.org/about/history/atoms-for-peace-speech>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Centrale elettronucleare Montalto di Castro*’, Wikipedia, 2023 <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Centrale_elettronucleare_Montalto_di_Castro&oldid=132832856> [ultimo accesso 17 Maggio 2023]

‘Centro Informazioni Studi ed Esperienze in “Dizionario delle Scienze Fisiche”’,
Treccani <[https://www.treccani.it/enciclopedia/centro-informazioni-studi-ed-esperienze_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/centro-informazioni-studi-ed-esperienze_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche))> [ultimo accesso 17 Maggio 2023]

‘Comitato nazionale per le ricerche nucleari in “Dizionario delle Scienze Fisiche”’, Treccani <[https://www.treccani.it/enciclopedia/comitato-nazionale-per-le-ricerche-nucleari_\(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/comitato-nazionale-per-le-ricerche-nucleari_(Dizionario-delle-Scienze-Fisiche))> [ultimo accesso 17 May 2023]

‘Conversione in legge, con modificazioni, del decreto-legge 25 giugno 2008, n. 112, recante disposizioni urgenti per lo sviluppo economico, la semplificazione, la competitività, la stabilizzazione della finanza pubblica e la perequazione tributaria’,
Parlamento Italiano
<<https://www.parlamento.it/parlam/leggi/081331.htm>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Corbino, Orso Mario in “Il Contributo italiano alla storia del Pensiero: Scienze”’,
Treccani <[https://www.treccani.it/enciclopedia/orso-mario-corbino_\(Il-Contributo-italiano-alla-storia-del-Pensiero:-Scienze\)](https://www.treccani.it/enciclopedia/orso-mario-corbino_(Il-Contributo-italiano-alla-storia-del-Pensiero:-Scienze))> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Costo livellato dell’elettricità (Levelized Cost of Energy)’, ENEA, 15 ottobre 2019
<<https://www.energiaenergetica.enea.it/glossario-efficienza-energetica/lettera-c/costo-livellato-dell-elettricit.html>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Cronistoria - Accordo di Parigi sui cambiamenti climatici’, Consiglio Europeo,
Consiglio dell’Unione europea
<<https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/paris-agreement/timeline-paris-agreement/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Decreto legislativo 15 febbraio 2010, n. 31’, Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana

<<https://www.gazzettaufficiale.it/gunewsletter/dettaglio.jsp?service=1&datagu=2010-03-08&task=dettaglio&numgu=55&redaz=010G0048&tmstp=1268385035952>>

[ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Disastro di Černobyl’’, Wikipedia, 2023

<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Disastro_di_%C4%8Cernobyl%27&oldid=133519755> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Energia nucleare in Italia’, Wikipedia, 2023

<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Energia_nucleare_in_Italia&oldid=133418421#La_ripresa_del_dibattito_sul_nucleare_.282008-2011.29> [ultimo

accesso 17 maggio 2023]

‘Enrico Fermi’, Wikipedia, 2023

<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Enrico_Fermi&oldid=133546426>

[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘European Nuclear Safety Regulators Group’, ENSREG (European Nuclear Safety Regulators Group) <<https://www.ensreg.eu/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Fusion’, ITER <<https://www.iter.org/sci/whatisfusion>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Geotermia, eolico e solare a confronto: LCA, quali performance per le energie rinnovabili?’, Cosvig, 29 maggio 2020 <<https://www.cosvig.it/geotermia-eolico-e-solare-a-confronto-lca-quali-perfomance-per-le-energie-rinnovabili/>> [ultimo

accesso 2 luglio 2023]

‘Green Deal europeo: la chiave per un’UE sostenibile e climaticamente neutrale’, Attualità Parlamento Europeo, 25 giugno 2020 (aggiornato il 3 maggio 2023) <https://www.europarl.europa.eu/news/it/headlines/society/20200618STO81513/green-deal-europeo-la-chiave-per-un-ue-sostenibile-e-climaticamente-neutrale?&at_campaign=20234-Green&at_medium=Google_Ads&at_platform=Search&at_creation=RSA&at_goal=TR_G&at_audience=green%20deal%20europeo&at_topic=Green_Deal&at_location=IT&gclid=CjwKCAjwv8qkBhAnEiwAkY-ahjoU2huNjlg0xZ2sgP0RRo4d7O-03VGdVJL3EhtH5eZq2pgSISPFwRoC66cQAvD_BwE> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘I reattori nucleari’, Lina Quintieri, Scienza per tutti <<https://scienzapertutti.infn.it/chiedi-allesperto/tutte-le-risposte/667-i-reattori-nucleari>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘IAEA’, Ministero dell’Università e della Ricerca, <<https://www.mur.gov.it/it/aree-tematiche/ricerca/ricerca-internazionale/accordi-multilaterali/iaea>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘IEA: nel 2025 il nucleare avrà costi altamente competitivi’ Associazione Italiana Nucleare (AIN), 10 dicembre 2020 <<https://www.associazioneitaliananucleare.it/iea-nel-2025-il-nucleare-avra-costi-altamente-competitivi/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Il dispositivo per la ripresa e la resilienza’, Commissione europea <https://commission.europa.eu/business-economy-euro/economic-recovery/recovery-and-resilience-facility_it> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Il dramma di una discarica chiamata lago Baotou. Dove nascono gli smartphone*’, Alessandro Mauceri, notizie geopolitiche, 25 aprile 2015 <<https://www.notiziegeopolitiche.net/il-dramma-di-una-discarica-chiamata-lago-baotou-dove-nascono-gli-smartphone/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Incidente di Chernobyl*’, Nucleare e Ragione, 2020 <<https://nucleareeragione.org/incidente-di-chernobyl/>> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Innovazione: I materiali che si recuperano dai pannelli fotovoltaici*’ Chiara Guzzanato, Focus, 9 marzo 2022 <<https://www.focus.it/tecnologia/innovazione/materiali-recuperati-pannelli-fotovoltaici>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*ISIN*’, Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione <[Ispettorato Nazionale per la Sicurezza Nucleare e la Radioprotezione \(isinucleare.it\)](http://isinucleare.it)> [ultimo accesso 3 luglio 2023]

‘*Joule - unità di misura*’, youmath, 30 giugno 2023 <<https://www.youmath.it/lezioni/fisica/unita-di-misura/misure-lavoro-energia-calore/3079-joule-unita-di-misura.html>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*La fisica del Tokamak - la centrale a fusione*’, consorzio RFX <<https://www.igi.cnr.it/ricerca/magnetic-confinement-research-in-padova/la-fisica-del-tokamak-la-centrale-a-fusione/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*La Magnitudo e La Scala Richter*’, G.M.P.E. <<https://www.gmpe.it/terremoti/magnitudo-scala-richter>> [ultimo accesso 21 maggio 2023]

‘*La Scala Degli Incidenti Nucleari*’, Energia - ANSA
<https://www.ansa.it/canale_scienza_tecnica/notizie/approfondimenti/energia/2011/04/18/la-scala-degli-incidenti-nucleari_326740e8-de1c-11e6-9836-00505695d1bc.html> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*La Storia dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare*’, INFN <<https://storia.infn.it/>>
[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Le 4 generazioni di centrale nucleare: quali sono le differenze e come funzionano*’,
Geopop, 12 ottobre 2021 <<https://www.geopop.it/le-4-generazioni-di-centrale-nucleare-quali-sono-le-differenze-e-come-funzionano/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Levelized cost of electricity*’, Wikipedia
<https://en.wikipedia.org/wiki/Levelized_cost_of_electricity> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Luangwa Project*’, Luca Chianca, Report, 19 giugno 2023
<<https://www.rai.it/programmi/report/inchieste/Luangwa-Project-aa44dac8-a5e7-4db6-9b1d-e5964f16cd37.html>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Marie Curie*’, Wikipedia, 2023
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Marie_Curie&oldid=133390694>
[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Marie Curie*’, Torino Scienza <<https://www.torinoscienza.it/personaggi/marie-curie>> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Marie Curie, la madre della fisica moderna*’, Storica-National Geographic, 2020
<https://www.storicang.it/a/marie-curie-madre-della-fisica-moderna_14937>
[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘NEA (Nuclear Energy Agency)’, NEA <<https://www.oecd-nea.org/>>

‘New IAEA Tools Help Countries Select Suitable Nuclear Reactor Technologies’
IAEA, 6 dicembre 2022 <<https://www.iaea.org/newscenter/news/new-iaea-tools-help-countries-select-suitable-nuclear-reactor-technologies>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘NextGenerationEU’, Commissione Europea
<https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/eu-budget/eu-borrower-investor-relations/nextgenerationeu_it?etras=it> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Nuclear History – the Forgotten Disasters’, Nuclear-News, 2012 <<https://nuclear-news.net/information/nuclear-history/nuclear-history-the-forgotten-disaster/>>
[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Nuclear Power in Japan’, World Nuclear Association, febbraio 2023
<<https://world-nuclear.org/focus/fukushima-daiichi-accident/japan-nuclear-power.aspx>>

‘Nuclear safety and security’, IAEA <<https://www.iaea.org/topics/nuclear-safety-and-security>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Nucleare, appello all'UE di 13 Paesi membri per i mini reattori: firma anche l'Italia’, La Stampa, 29 marzo 2023
<<https://finanza.lastampa.it/News/2023/03/29/nucleare-appello-allue-di-13-paesi-membri-per-i-mini-reattori-firma-anche-litalia/MTIfMjAyMy0wMy0yOV9UTEI>>
[ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Nucleare: Pichetto - Gava, da Parlamento preciso indirizzo a Governo’ Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica (ultimo aggiornamento 9 maggio 2023)
<<https://www.mase.gov.it/node/15975>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Obiettivi per lo sviluppo sostenibile*’ Nazioni Unite <<https://unric.org/it/agenda-2030/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Particella α* ’, Wikipedia, 2022
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Particella_%CE%B1&oldid=126269287> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Piano per la ripresa dell’Europa*’, Commissione Europea
<https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/recovery-plan-europe_it#:~:text=NextGenerationEU%20%C3%A8%20uno%20strumento%20temporaneo,alle%20sfide%20presenti%20e%20future> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Radioterapia*’, Michela Vuga, AIRC, 21 ottobre 2020
<<https://www.airc.it/cancro/affronta-la-malattia/guida-alle-terapie/radioterapia>>
[ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Ragazzi di via Panisperna*’, Wikipedia, 2023
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Ragazzi_di_via_Panisperna&oldid=133464350> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Reattore nucleare IV generazione*’, Wikipedia
<https://it.wikipedia.org/wiki/Reattore_nucleare_di_IV_generazione#:~:text=Sono%20due%20i%20reattori%20di,utili%20per%20la%20produzione%20di>
[ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Reattore nucleare RBMK*’, Wikipedia, 2023
<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Reattore_nucleare_RBMK&oldid=131493620> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Regolamento (UE) 2020/852 del Parlamento Europeo e del Consiglio del 18 giugno 2020 relativo all’istituzione di un quadro che favorisce gli investimenti sostenibili e recante modifica del regolamento (UE) 2019/2088’ Gazzetta ufficiale dell’Unione Europea

<<https://eur-lex.europa.eu/legalcontent/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R0852>>
[ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Scala INES’, Wikipedia, 2023

<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Scala_INES&oldid=133438548>
[ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Statuto rivisto per l’Agenzia di approvvigionamento dell’Euratom’, EUR-lex, 11 settembre 2018 <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM:l27052>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘Storia dell’energia nucleare’, Wikipedia, 2023 <https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Storia_dell%27energia_nucleare&oldid=133376749> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘Tassonomia UE ed energia nucleare’ nucleare e ragione <<https://nucleareeragione.org/tassonomia-ue/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘The INES Scale’, Laradioactivite.Com <https://laradioactivitefr.gatsbyjs.io/nuclearenergy/ines_scale> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘The ITER Tokamak’ ITER <<https://www.iter.org/mach>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘The Kyshtym Disaster’, Miss Cellania, Mental Floss, 12 novembre 2015 <<https://www.mentalfloss.com/article/71026/kyshtym-disaster-largest-nuclear-disaster-youve-never-heard>> [accessed 17 May 2023]

‘*The Statute of the IAEA*’ IAEA <<https://www.iaea.org/about/statute>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Trattato che istituisce la Comunità europea dell’energia atomica (Euratom)*’ EUR-Lex <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM:xy0024>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*TRISO Particles: The Most Robust Nuclear Fuel on Earth*’, office of Nuclear Energy, 9 luglio 2019 <<https://www.energy.gov/ne/articles/triso-particles-most-robust-nuclear-fuel-earth>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*Uranio*’, Treccani <<https://www.treccani.it/enciclopedia/uranio>> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Uranio*’, Wikipedia, 2023 <<https://it.wikipedia.org/w/index.php?title=Uranio&oldid=132905563>> [ultimo accesso 17 maggio 2023]

‘*Verde sì, ma non per tutti*’ nucleare e ragione, 25 maggio 2015 <<https://nucleareeragione.org/2015/05/25/verde-si-ma-non-per-tutti/>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*What is Fusion, and Why Is It So Difficult to Achieve?*’ Irena Chatzis, Matteo Barbarino, IAEA, maggio 2021 <https://www-iaea-org.translate.goog/bulletin/what-is-fusion-and-why-is-it-so-difficult-to-achieve?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=it&_x_tr_hl=it&_x_tr_pto=wapp> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

‘*What is Nuclear Energy? The Science of Nuclear Power*’ Andrea Galindo, IAEA, 15 novembre 2022 <<https://www.iaea.org/newscenter/news/what-is-nuclear-energy-the-science-of-nuclear-power>> [ultimo accesso 2 luglio 2023]

Figura 1: *‘La fissione nucleare’*, Mondadori
<<https://www.mondadorieducation.it/content/uploads/2022/12/09-ME-fisica-monte-image002.jpg?x99695>>

Figura 2: *‘Le centrali elettro-nucleari’*, Educazione online
<https://www.educazionetecnicaonline.com/tag/nucleare/>

Figura 3: *‘INES, The international nuclear and radiological event scale’*, IAEA, OECD, s.n.

Figura 4: *‘INES, The international nuclear and radiological event scale’*, IAEA, OECD, s.n.

Figura 5: *‘La corsa dell’uranio è appena iniziata, la Cina si fionda sul nucleare per raggiungere il net zero’*, Studi, Ufficio, FinanzaOnline, 17 maggio 2023. <<https://www.finanzaonline.com/notizie/la-corsa-delluranio-e-appena-iniziata-la-cina-si-fionda-sul-nucleare-per-raggiungere-il-net-zero.>>

Figura 6: *‘Il Pentagono utilizza la tecnologia TRISO per progettare i suoi mini reattori nucleari’*, Meta-Defense.fr-Plus que l’actualité Défense, 9 aprile 2020 <[Per progettare i suoi mini reattori nucleari, il Pentagono si affida alla tecnologia TRISO - Meta-Defense.fr](#)>

Figura 7: *‘La fusione nucleare’*, Mondadori,
<<https://www.mondadorieducation.it/fisica-scientifica-ss2/fusione-nucleare-lenergia-del-futuro/>>

Figura 8: *‘Frascati ospiterà il Divertor Tokamak Test facility’*, Leone M., Cronache del Silenzio, 4 aprile, 2018 <[Frascati ospiterà il Divertor Tokamak Test facility - Cronache dal Silenzio](#)>

Figura 9: ‘Carbon Neutrality in the UNECE Region: Integrated Life-cycle Assessment of Electricity Sources’, UNECE, 2021

Figura 10: ‘Projection Costs of Generating Electricity’, IAEA, NEA, 2020 edition

Figura 11: ‘Il ruolo dell’energia nucleare per la decarbonizzazione profonda di elettricità, calore e idrogeno’, Mathis A., l’Astrolabo, 3 luglio 2023
<https://astrolabo.amicidellaterra.it/node/2902#:~:text=Il%20sistema%20%E2%80%9Cda%20nucleare%20a,di%20calore%20ad%20alta%20temperatura>

Figura 12: ‘Mappa dei siti di decommissioning’, Sogin S.p.A
<https://www.sogin.it/it/grupposogin/chisiamo/Pagine/default.aspx>

Figura 13: <<https://app.electricitymaps.com/map>>

Figura 14: <<https://app.electricitymaps.com/map>>

Tabella 1: ‘Energie rinnovabili: cosa sono?’ Zabatta A., Biopills, 22 febbraio 2019
< <https://www.biopills.net/energie-rinnovabili/>>

‘Pro e contro dell’energia nucleare spiegati in modo’, Gandelli S., Geopop, 22 ottobre 2022 < <https://www.geopop.it/pro-e-contro-dellenergia-nucleare-spiegati-in-modo-semplce/>>

RINGRAZIAMENTI

Eccomi giunta alla fine di questa tesi e di questo percorso che ho tanto atteso e sperato. Sono stati tre anni pieni; pieni di avventure, di ansie e di gioie.

In primis vorrei ringraziare il relatore di questa tesi, il professore Antonio Galgaro, per la sua disponibilità e per avermi supportata nella scelta di questo argomento. Gli sono molto grata per avermi aiutato a portare avanti questo mio progetto.

Vorrei dedicare questi ringraziamenti a coloro che con immenso sacrificio mi hanno permesso di arrivare alla fine di questo percorso: a mamma Roberta e a papà Luca, coloro che fin dall'inizio hanno sempre creduto in me, supportata in ogni mia scelta e spronata nel mettermi sempre in gioco. Coloro che sono rimastati sempre al mio fianco e a cui devo le mie più grandi vittorie. Grazie per tutto quello che avete fatto per me e per tutte quelle esperienze che mi avete permesso di vivere. Non smetterò mai di ringraziarvi per avermi fatta crescere in una famiglia così piena d'amore.

In particolare, un sentito grazie a mio papà, grazie per l'incredibile aiuto che mi ha dato in questi ultimi mesi, per tutte quelle giornate e notti passate a discutere sul nucleare. Grazie veramente perché molto probabilmente senza il tuo aiuto non sarei qui in questo momento.

A mio fratello Davide, sarò eternamente grata a mamma e a papà per averti (o averci) fatto così "speciale (i)". Grazie perché, senza un fratello come te mi sentire in completa, grazie perché con il tuo modo di fare arricchisci ogni mia giornata. Anche se abbiamo il nostro modo di volerci bene (cioè, prendendoci in giro) so che cammineremo sempre fianco a fianco e so che per qualsiasi cosa ci sarai sempre, come io per te.

Ai miei nonni Tarcisio e Antonio (detto Toni) e alle mie nonne Marisa ed Elena, a voi un super grazie per essere dei nonni fantastici sempre pronti a supportare la nostra famiglia e a non farci mancare mai niente. Siete una forza della natura e sono così contenta di poter festeggiare questo traguardo con voi.

Alla mia bisnonna Maria, che purtroppo non sarà presente qui con noi, ma so per certo che anche lei, dovunque sia, stia festeggiando questo traguardo insieme a me.

A Simone, ormai una presenza costante nella mia vita. Grazie per ricordarmi ogni giorno quanto sono grandi le narici del mio naso, mostrando orgogliosamente come il tuo pollice ci stia dentro tranquillamente. A parte gli scherzi, grazie per tutta la pazienza che porti ogni giorno sopportandomi, soprattutto in questi ultimi mesi. Ma soprattutto grazie per tutto il supporto che mi hai dato in questi anni, spronandomi a non mollare mai e a credere sempre in me. Sei quella persona che nonostante tutto, è sempre restata al mio fianco e per questo non smetterò mai di ringraziarti. Persona migliore non potevo trovare.

Un ringraziamento speciale va alle mie amiche dell'università con la quale ho condiviso molti momenti belli ed è anche grazie a loro che sono riuscita a raggiungere questo traguardo.

A tutti i miei zii, Michele, Nadia, Paolo, per l'amore e il sostegno che ricevo ogni giorno; a mia cugina Sara, grazie anche a te per il supporto e la forza che mi hai dato in questi mesi. Al piccolo Nicholas, che più che un cugino lo reputo il mio fratellino, sempre pronto a rendere le mie giornate piene.

Grazie a tutti i miei amici, a quelli di una vita e a quelli che ho incontrato durante il mio percorso, sono felice di aver persone come voi accanto a me, sempre pronti a sostenermi e ad accettarmi per quella che sono.

Vorrei concludere questi ringraziamenti con una frase che mi è stata detta quando ero molto piccola e penso mi rappresenti appieno: "Che putina birichina" (che significata che bambina birichina/furba), caro bisnonno Bruno ci hai visto lungo quella volta.