



Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



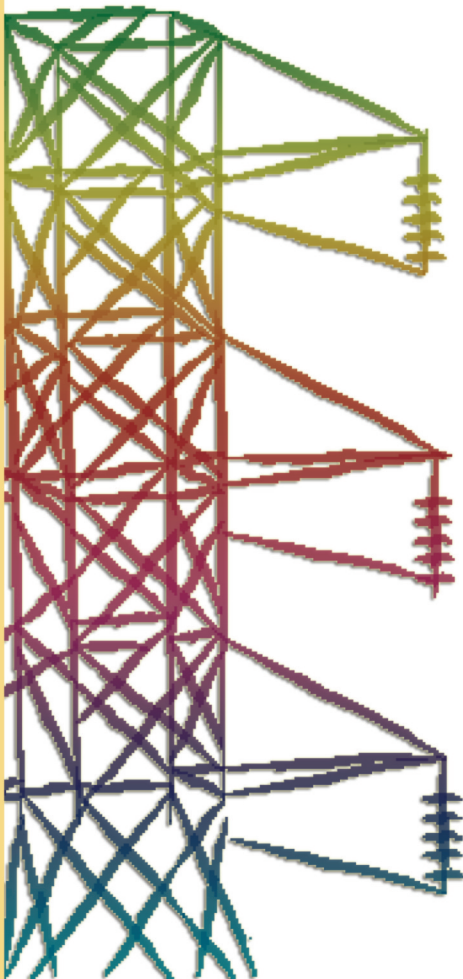
*Ministero dello Sviluppo Economico*

## **RICERCA SISTEMA ELETTRICO**

---

### **Analisi di scenari energetici: introduzione di reattori nucleari innovativi**

**Giuseppe Forasassi, Barbara Vezzoni**





Ente per le Nuove tecnologie,  
l'Energia e l'Ambiente



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA SISTEMA ELETTRICO

## Analisi di scenari energetici: introduzione di reattori nucleari innovativi

*Giuseppe Forasassi, Barbara Vezzoni*



## ANALISI DI SCENARI ENERGETICI: INTRODUZIONE DI REATTORI NUCLEARI INNOVATIVI

Giuseppe Forasassi, Barbara Vezzoni (CIRTEN)

Dicembre 2008

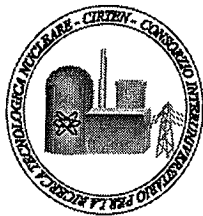
Report Ricerca Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Produzione e fonti energetiche

Tema: Nuovo Nucleare da Fissione

Responsabile Tema: Stefano Monti, ENEA



**CIRTEN**  
**CONSORZIO INTERUNIVERSITARIO**  
**PER LA RICERCA TECNOLOGICA NUCLEARE**

**UNIVERSITA' DI PISA**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA NUCLEARE E DELLA  
PRODUZIONE**

**Analisi di Scenari Energetici: Introduzione di Reattori Nucleari  
Innovativi**

**AUTHORS**

**Prof. G. FORASASSI**

**Ing. B. VEZZONI**

**CIRTEN CERSE-UNIFI RL 1051/2008**

*Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP1 punto B dell'AdP ENEA-MSE del 21/06/07  
Tema 5.2.5.8 – "Nuovo Nucleare da Fissione".*

## INDICE

1. Introduzione .....	2
2. Metodologia alla base dell'analisi di scenario .....	6
2.1 Domanda energetica futura .....	8
2.2 Indicatori significativi del settore elettro-nucleare .....	15
2.3 Indicatori adottati per l'analisi di scenario .....	24
3. Primi risultati ottenuti .....	26
3.1 Phase-out .....	28
3.2 Scenario LOW .....	32
3.3 Scenario HIGH .....	36
4. Conclusioni .....	46
Riferimenti bibliografici .....	46

## 1. Introduzione

Negli ultimi tempi gli organismi di Governo Internazionale hanno preso coscienza che lo sviluppo seguito dai Paesi industrializzati, che ha visto come motore trainante i combustibili fossili, non è uno sviluppo sostenibile né per l'attuale generazione né tanto meno per quelle future.

In questo contesto, una delle sfide fondamentali a cui è sottoposta la nostra società è quella di garantire le risorse energetiche atte a sostenere la crescita e lo sviluppo economico dei Paesi in via di sviluppo e dei Paesi già industrializzati. Inscindibile da questa sfida c'è la necessità di salvaguardare l'ambiente, bene comune che si può dire anche in prestito delle generazioni future.

E' relativamente a questi temi che la politica dall'Unione Europea negli ultimi anni si è andata sempre più definendo. Infatti a partire dal 2006 con le posizioni assunte nel 'LIBRO VERDE: Una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura [1] si è iniziato a parlare di 'sviluppo sostenibile anche in ambito energetico europeo. Tale approccio è stato affermato di nuovo dalla decisione del Consiglio Europeo del 9 marzo 2007 dove è stato richiesto a tutti gli Stati membri di 'sviluppare una politica europea climatica ed energetica integrata e sostenibile [2].

Per far questo il Consiglio ha individuato alcune azioni prioritarie per contrastare i cambiamenti climatici, mirate tutte al raggiungimento dell'obiettivo strategico di limitare l'aumento della temperatura media globale al massimo a 2°C rispetto ai livelli preindustriali.

Per raggiungere tale obiettivo, nel rispetto del mix energetico scelto dagli Stati membri e della loro sovranità sulle fonti di energia primaria, sarà necessario agire sulla sicurezza dell'approvvigionamento dei singoli Stati (aumentandone la sicurezza), garantire la competitività delle economie europee e la disponibilità di energia a prezzi accessibili e promuovere la sostenibilità ambientale di tali scelte [2].

I punti da cui partire saranno dunque il sostanziale sviluppo dell'efficienza energetica (sia per quanto riguarda gli impianti di produzione elettrica, ma soprattutto relativamente al settore dei trasporti) e l'uso di tecnologie a basso contenuto di Carbonio: fonti rinnovabili, nucleare e tecnologie a cattura e confinamento di CO<sub>2</sub> (CCC).

Per quanto riguarda le fonti rinnovabili è stato stabilito un obiettivo vincolante per l'Unione Europea che prevede il raggiungimento della quota del 20% sul totale dei consumi energetici entro il 2020 [2].

Obiettivo questo che, insieme alla riduzione del 20% di emissioni di CO<sub>2</sub> entro il 2020 ed all'incremento dell'efficienza energetica del 20% sempre entro quella data, è ancora al vaglio per la definitiva approvazione da parte del Parlamento Europeo.

Per quanto poi riguarda l'energia nucleare, basandosi sulla valutazione effettuata dalla Commissione, è

stato evidenziato il contributo importante del nucleare in termini di approvvigionamento energetico e di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Ciascuno Stato membro potrà decidere se fare affidamento o meno sull'energia nucleare, nell'ottica però che sia in grado di rispettare gli accordi presi a livello comunitario ed internazionale (ad esempio il rispetto del Protocollo di Kyoto), comunque tendendo a migliorare ulteriormente la sicurezza nucleare e a trovare soluzioni accettabili per quanto riguarda la gestione dei rifiuti radioattivi.

Per spiegare maggiormente l'importanza del contributo dell'energia nucleare per il mix energetico europeo, può essere utile riportare brevemente la posizione assunta dal Parlamento Europeo (26 Settembre 2007) che afferma che 'Notes that short and medium term decisions on the use of nuclear power will also directly affect the climatic goals that the EU might realistically set; notes that renunciation of nuclear power will make it impossible to achieve the objectives set regarding reductions in greenhouse gas emissions and the combating of climate change' [3].

E' in questo contesto generale che vengono introdotte le analisi di scenario, cioè le analisi della fornitura energetica in funzione della domanda energetica globale, come strumento di sostegno alle scelte energetiche che i singoli Stati saranno costretti ad intraprendere a breve e medio termine. Le analisi di scenario altro non sono che strumenti previsionali, più o meno complessi ed accurati, che hanno lo scopo di mettere a confronto le diverse soluzioni pensabili a soddisfare la richiesta energetica per poi scegliere, sulla base di dati ed informazioni le più robuste possibili, la strategia da adottare.

Organismi Internazionali, quali IAEA, IEA, IPCC, hanno sviluppato codici e sistemi per poter affrontare ed analizzare la crescita della futura domanda energetica globale in rapporto alla copertura energetica da adottare. Ognuno di questi organismi ha fornito alcuni scenari evolutivi attesi ed ha indicato quali potrebbero essere le possibili soluzioni da intraprendere.

In particolare l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ha proposto 40 'Emission Scenarios' [4] rappresentativi dell'andamento delle emissioni di CO<sub>2</sub> dal 1990 al 2100 e diversificati sulla base dello sviluppo demografico, dello sviluppo socioeconomico e dei cambiamenti tecnologici attesi.

L'International Energy Agency (IEA) ha pubblicato recentemente (giugno 2008) il report 'Energy Technology Perspectives' [5], di supporto alle decisioni di politica energetica del G8, dove sono presentati e analizzati scenari e strategie da oggi al 2050 basati su un uso estensivo di rinnovabili, nucleare e CCC.

Particolarmente interessanti per il presente lavoro sono gli scenari indicati dall'International Atomic Energy Agency (IAEA) dell'agosto 2008 [6], perché oltre a fornire alcuni trend di crescita ci

permettono di ricavare informazioni più dettagliate sulla frazione che si pensa andrà coperta con il nucleare.

A questo punto che il substrato comune delle analisi è stato tratteggiato, seppur molto brevemente, rimane da entrare nel dettaglio delle analisi di scenario elettronucleare attualmente in fase di studio presso il CIRTEN- Università di Pisa (UNIFI). Sarà necessario allora contestualizzare al nucleare gli scenari energetici sopra richiamati ed individuare per il nucleare una metodologia adatta a confrontare le varie strategie possibili.

Detto ciò, è bene fin da ora evidenziare, che gli scenari elettronucleari implementati sono il più possibile rappresentativi della condizione attuale Europea, tenendo conto, per ogni singolo Stato considerato degli attuali reattori in esercizio, della possibilità o meno di 'phaseout' dalla produzione elettricnucleare, della possibilità di implementare la strategia del 'Plant Life EXtention' (PLEX) e più in generale della politica energetica adottata.

E' sulla base della politica energetica che è stato deciso di focalizzare l'analisi su tre grandi aree di interesse:

Belgio - Spagna - Germania, perché rispettivamente questi Stati hanno votato la graduale 'phaseout' dalla produzione elettricnucleare nel 2003/2002, decisione che potrà essere riaperta nel prossimo futuro per garantire l'indipendenza energetica del Paese e rispettare gli accordi presi in termini di riduzione delle emissioni di gas serra.

Francia, perché ha attualmente un grande piano energetico nucleare e non ci sono ragioni perché non continui in questa direzione.

Italia, in quanto sarà probabilmente necessario reintrodurre a medio termine nel parco macchine nazionale gli impianti nucleari per contrastare e ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> e per garantire l'indipendenza energetica del nostro Paese.

Dopo aver individuato le aree di interesse, occorre tenere conto delle tecnologie da adottare e quindi con quali reattori andare a modellare gli scenari. E' stato scelto di analizzare l'introduzione di reattori innovativi all'interno del parco macchine esistente nel singolo Stato tenendo conto della domanda energetica attesa (dati provenienti dagli Organismi Internazionali) e della frazione di nucleare ipotizzabile.

I reattori di maggior interesse sono quelli proposti all'interno della Generation IV, sei tipologie di reattori, con particolare riguardo agli obiettivi di sostenibilità, economicità, sicurezza e resistenza alla proliferazione [7].

In particolar modo, visti i progetti europei in cui i CIRTEN-UNIFI sono coinvolti [8, 9], sono stati



implementati scenari che vedono l'introduzione di reattori veloci refrigerati a metalli liquidi (piombo) in sinergia con i reattori di III generazione già provvisti di 'licensing' e quindi commerciabili. I reattori al piombo sono una delle tipologie considerate nella GenIV sotto il nome di 'Lead Cooled Fast Reactor System (LFR)' [7] che ha suscitato molto interesse nel nostro Paese anche per l'esperienza progressa in termini di studi, ricerca scientifica ed attrezzature sperimentali disponibili.

Quindi, per poter coprire il lasso di tempo fra oggi ed il momento in cui i reattori di IV generazione saranno commercializzabili si è ritenuto necessario introdurre in una prima fase anche i reattori di III e III+ generazione. In particolare si è fatto riferimento all'introduzione dell'EPR ('European Pressurized Reactor'), reattore progettato dall'AREVA che altro non è che un advanced PWR dove le caratteristiche di sicurezza sono state incrementate ulteriormente introducendo 4 treni diversificati e indipendenti di sistemi di refrigerazione di emergenza del core (probabilità di danneggiamento del core dell'ordine dei  $6.1 \cdot 10^{-7}$  reattoreanno) e il doppio contenimento. Attualmente reattori di questa tipologia sono in costruzione sia in Francia a Flamanville che in Finlandia ad Olkiluoto. Figura 1 e Figura 2 mostrano gli schemi semplificati rispettivamente dell'EPR e del LFR.

In quanto segue, si entrerà nel dettaglio della metodologia adottata per l'analisi degli scenari elettro-nucleari proposti, vengono evidenziati gli step fondamentali dell'analisi proposta tenendo presente che si tratta comunque essenzialmente di una applicazione a livello metodologico.

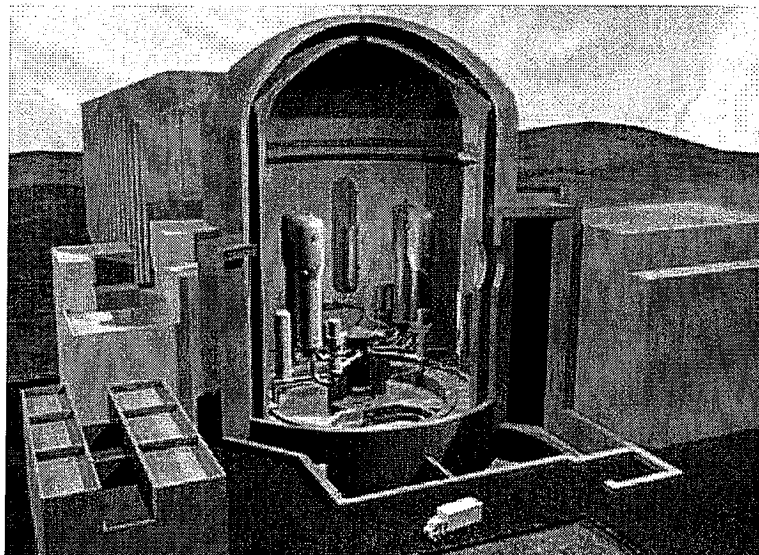


Figura 1: Schema semplificato reattore EPR progettato da AREVA

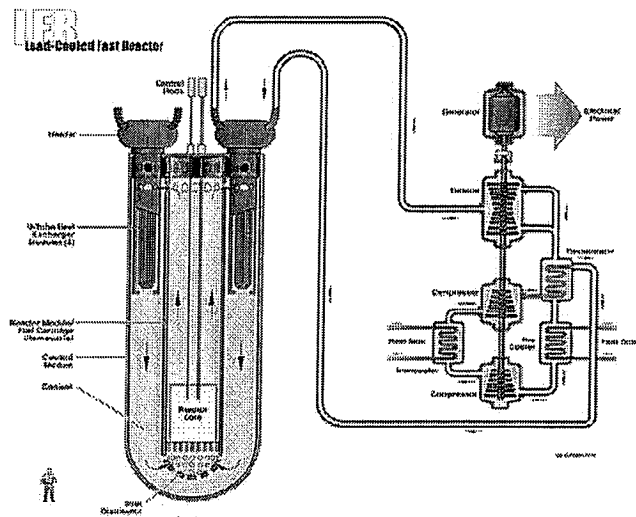


Figura 2: Schema semplificato reattore veloce refrigerato a piombo

## 2. Metodologia alla base dell'analisi di scenario

Per poter giustificare a pieno le scelte fatte nell'ipotizzare gli scenari è necessario fissare fin dall'inizio una metodologia operativa da adottare in tutti i casi presentati.

Grazie a questa metodologia comune sarà, dunque, possibile confrontare in modo adeguato tutte le soluzioni possibili.

La metodologia adottata è molto semplice. Il punto di partenza è la conoscenza dettagliata dello Stato (o dell'area) per il quale si sono state sviluppate diverse ipotesi di scenario. Uno dei fattori fondamentali da conoscere è la politica energetica dello Stato considerato, e il legame che essa ha con le direttive adottate in ambito europeo.

Questo si traduce nell'analizzare nel dettaglio il parco macchine installato su di un particolare territorio, andando ad individuare tramite un'analisi qualitativa le tipologie di impianti installati (impianti a combustibile fossile, impianti a fonti rinnovabili, impianti nucleari..) e tramite un'analisi quantitativa mirata a determinare per ogni fonte energetica il contributo in energia primaria ed in energia elettrica prodotta.

E' ben noto che il nucleare contribuisce maggiormente alla produzione elettrica e solo in piccola parte ad altri usi industriali, quindi anche l'analisi portata avanti con questo lavoro è stata focalizzata sul settore elettrico andando ad individuare la percentuale coperta dal nucleare e l'andamento che essa ha avuto negli anni passati, in modo da poter avere un'idea circa l'andamento atteso a breve termine. In

questa analisi di partenza sullo stato attuale del Paese un altro fattore preso in considerazione ed opportunamente evidenziato è l'età dei reattori attualmente in esercizio, fattore fondamentale per poter sviluppare uno scenario di transizione.

Nota poi la condizione di partenza del Paese considerato in termini di produzioneconsumi elettrici è stato definito l'andamento della domanda futura cui far fronte. Il punto di partenza per questa seconda parte dell'analisi sono le pubblicazioni internazionali dell'IPCC, dell'IEA e dell'IAEA.

In particolare, per omogeneizzare i dati usati in ambito nucleare, la pubblicazione di riferimento adottata è 'Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2030' dell'IAEA [6] che suddivide la domanda energetica futura a seconda di due andamenti di crescita: scenario LOW and scenarioHIGH. Maggiori dettagli circa i dati utilizzati saranno riportati nel par. (2.1) in relazione alla parte più quantitativa dell'analisi svolta.

Una volta nota la domanda di energia elettrica per il periodo 2008-2050, è possibile introdurre varie ipotesi circa la frazione da coprire con il nucleare. A questo punto, sulla base di tali ipotesi, si possono costruire gli scenari; dove per scenario si intende l'introduzione di reattori di III e IV generazione a parziale sostituzione ed integrazione dell'attuale parco macchine in esercizio (se si tratta del caso italiano non si è potuto parlare di scenario di sostituzione ma direttamente di introduzione ex novo di un certo numero di reattori).

Nella modellizzazione degli scenari si è tenuto conto necessariamente della disponibilità o meno di una certa tecnologia. Per esempio, si è ipotizzato di introdurre i reattori di IV generazione solo dopo una certa data, visto che sono ancora ad uno stato di R&D; tale data nella migliore delle ipotesi sarà intorno al 2030 [7].

Una volta ipotizzati gli scenari, è necessario stabilire quali sono gli 'strumenti' che dovranno essere utilizzati per il confronto fra le varie alternative.

Si è passato quindi ad individuare gli indicatori ritenuti significativi per il settore elettronucleare, per poi, fra questi, individuare quelli scelti come più significativi per quanto riguarda l'analisi di scenario, fase questa detta anche 'fuel cycle analysis'. Maggiori dettagli saranno presentati nel par. (2.2) ma fin da ora è bene ricordare quale è stata la scelta alla base per tali parametri.

In particolar modo si è partiti dalla considerazione che se si vuole sviluppare ed incrementare la produzione elettrica tramite fonte nucleare come strumento per ridurre le emissioni di CO<sub>2</sub> è necessario andare ad agire anche sull'accettabilità di questa fonte energetica. Per individuare gli aspetti salienti sono state analizzate le maggiori critiche che vengono mosse da parte dell'opinione pubblica al nucleare. Il principale strumento per far questo è stato 'L'Eurobarometro' [10].

L'Eurobarometro è lo strumento di cui si è dotata la Commissione Europea per realizzare sondaggi mirati a conoscere e comprendere gli atteggiamenti dei cittadini europei circa temi di interesse pubblico.

E' ben noto che, per quanto riguarda l'utilizzo del nucleare per la produzione elettrica, uno degli aspetti che maggiormente trovano opposizione da parte dell'opinione pubblica è la gestione dei rifiuti radioattivi prodotti dagli impianti.

L'Eurobarometro del 2005 si è andato concentrando proprio su questa tematica proponendo ai cittadini Europei un questionario per vagliare le attitudini di essi circa l'energia Nucleare [10]. Quello che è emerso è che i cittadini non hanno informazione circa i rifiuti radioattivi prodotti nè in termini di quantità nè in termini di pericolosità e tanto meno sono a conoscenza delle possibili soluzioni tecniche al problema.

Basandosi su questa analisi nel presente lavoro si vogliono confrontare i vari scenari con attenzione alla gestione dei rifiuti radioattivi da destinare a deposito. Per questo motivo è stata confrontata la radiotossicità del combustibile esausto, per valutarne la pericolosità a lungo termine, i volumi coinvolti e il calore di decadimento rilasciato, entrambi parametri importanti per l'analisi del deposito.

Dato poi che si parla di sviluppo sostenibile, è stato necessario prendere in considerazione anche un'analisi delle risorse coinvolte. Si è partiti dall'analisi delle risorse di Uranio naturale, ad oggi necessarie per i reattori in esercizio, per poi passare ad analizzare anche le risorse aggiunte di Plutonio, necessarie per introdurre i reattori di IV generazione [11].

In Figura 3 è rappresentato uno schema semplificato della metodologia adottata. Sono evidenziati i vari step principali: modellizzazione parco macchine, crescita della domanda energetica, ipotesi sulla frazione di nucleare, definizione degli scenari, analisi e confronto degli scenari.

## **2.1 Domanda energetica futura**

Stabilire quale sarà la domanda energetica dei prossimi anni, non è semplice perchè molti fattori sono concorrenti a determinarla. Tali fattori sono eterogenei e spaziano dalla stima della crescita attesa per la popolazione mondiale, alla rapidità di industrializzazione dei Paesi adesso in fase di forte sviluppo (India e Cina), allo sviluppo dei Paesi del Sud del Mondo ma anche fino a considerare le politiche adottate per salvaguardare l'ambiente nei Paesi già sviluppati.

Senza ombra di dubbio, questo processo previsionale è affetto da molte incertezze. I valori di energia attesa, espressi in termini di EJ o di TWh prodotti, non vanno dunque considerati come valori realmente riscontrabili ma quello che è significativo è invece l'andamento della crescita attesa. Questi valori

relativi agli andamenti sono considerati accettabili, da un punto di vista della ragionevolezza dei dati, perchè i modelli utilizzati per ottenerli si basano in primo luogo sui valori reali di crescita della domanda energetica avuta negli anni scorsi (Figura 4) e quindi sono costruiti in continuità a quanto accaduto nel singolo Stato per il passato.

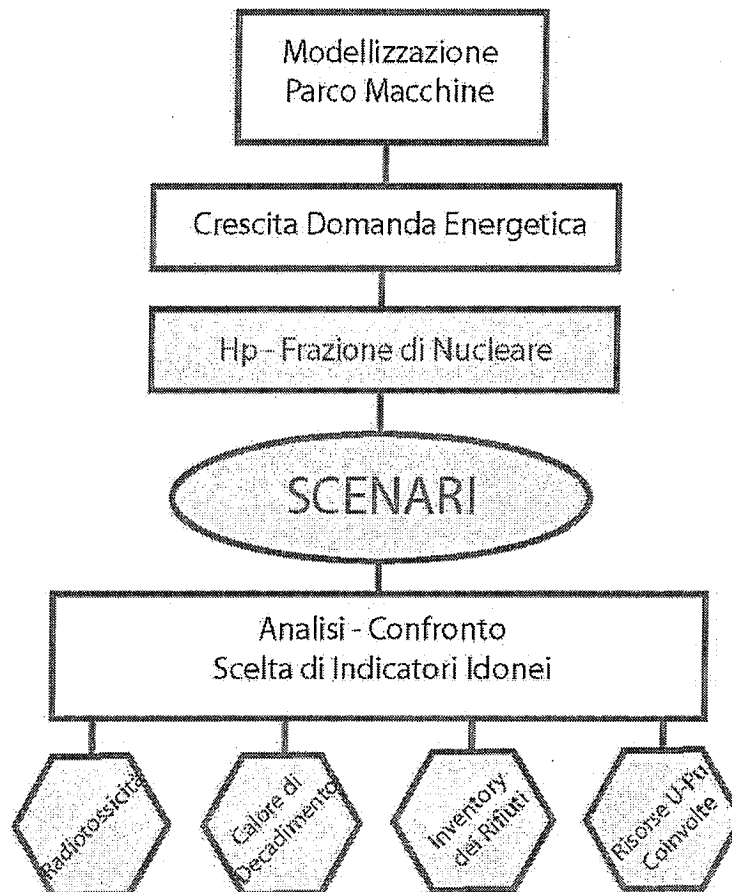


Figura 3: Schema a blocchi semplificato della metodologia adottata nelle analisi di scenario

Per la complessità della materia è dunque poco proficuo stabilire autonomamente i trend di crescita globali attesi, ma risulta più adeguato far riferimento ed utilizzare i dati ricavabili da una ricerca bibliografica riferita alle pubblicazioni degli organismi internazionali. Basando lo studio su questi dati internazionali è possibile effettuare un migliore confronto dei risultati ottenuti con quelli presentati in altri lavori, limitando almeno in parte i gradi di libertà che possono essere introdotti e le relative le incertezze.

In particolar luogo come già indicato gli organismi, accreditati a livello internazionale, che si occupano

di tali previsioni non sono molti e i più autorevoli sono l'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), l'International Energy Agency (IEA) e l'International Atomic Energy Agency (IAEA). In aggiunta a questi ultimi si considera anche la Nuclear Energy Agency (NEA/OECD), relativamente però al solo ambito nucleare, fornisce alcune proiezioni fino al 2030.

Dopo un'attenta analisi di queste pubblicazioni è stato deciso di riferirsi alle pubblicazioni della IAEA che danno i valori previsionali fino al 2030, sia in termini di energia totale sia in termini di crescita attesa del nucleare [6]. A seguito dello studio dei dati presentati dalle pubblicazioni sopra citate, si è notato un accordo fra i dati dell'IAEA e dell'IEA e si è deciso di estrapolare gli andamenti fino al 2050, anno per noi di particolare interesse perché dovrebbe vedere già la messa in funzione dei reattori di IV generazione e magari presentare alcune condizioni di equilibrio. In aggiunta alcuni dati presentati dalla NEA, anch'essi in accordo con IAEA e IEA, sono stati usati ad integrazione per simulare i cicli nucleari di nostro interesse [12].

Gli scenari proposti dalla IAEA sono di semplice interpretazione, mostrano, infatti, solo due possibili vie di crescita energetica: scenario-HIGH e scenario-LOW.

Indubbiamente per raffinare l'analisi potranno essere introdotte altri aspetti più di dettaglio, ma in questa prima fase, per focalizzare meglio l'obiettivo del lavoro, si è preferito considerare solo queste due possibilità, vista anche la flessibilità che permettono nel poter simulare svariati scenari elettro-nucleare al proprio interno.

Questi due scenari sono stati considerati come condizioni al confronto entro cui far muovere l'evoluzione attesa. In aggiunta, la scelta di due soli scenari ha permesso di utilizzare i dati della NEA, soprattutto quelli relativi al ciclo del combustibile nucleare [12] perché anch'essi mostrano previsioni suddivise in caso HIGH e caso LOW.

Partendo dai dati storici Mondiali (Figura 4) ed Europei (Figura 5) si riscontra che nel periodo fra il 1980 e il 2005 l'energia totale richiesta è andata aumentando rispettivamente del 2% annuo per il panorama Mondiale e del 1.1% annuo per l'Europa. Sempre nello stesso periodo il rateo di crescita della popolazione mondiale dell'1.6%.

Analizzando su questa base anche il contributo fornito dal nucleare si ottiene che a livello mondiale il nucleare è aumentato ad un rateo di 5.8% annuo, che nel 2005 significa aver coperto con tale fonte una percentuale del 6.1% del totale dell'energia richiesta. Tale valore aumenta e diventa pari al 15.5% se si considera il totale dell'energia elettrica richiesta, energia elettrica cresciuta globalmente con un rateo del 2.9% annuo.

Se si guardano invece i valori relativi all'Europa occidentale il nucleare nel 2005 ha raggiunto il 14%

dell'energia totale, crescendo ad un rateo annuo medio del 6.1%. Lo stesso rateo annuo è riscontrabile anche per quanto riguarda la produzione elettrica e ha portato ad ottenere che il 29% dell'energia elettrica in Europa sia prodotto tramite impianti nucleari (Figura 6).

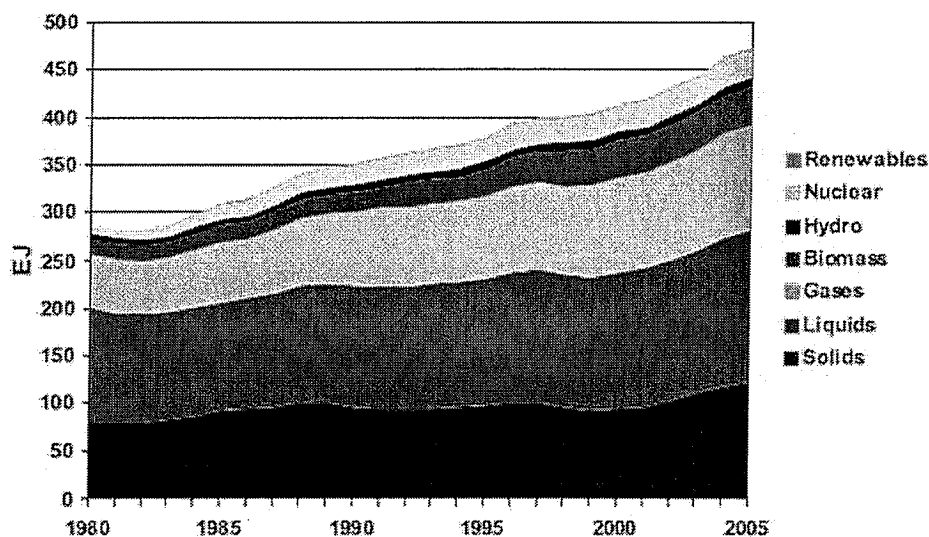


Figura 4: Dati storici (1980-2005) andamento mondiale dell'uso dell'energia primaria suddivisa per fonti energetiche [6]

Sulla base di questi trend l'IAEA ha fornito quelle proiezioni in termini di energia primaria, elettricità ed uso del nucleare che sono state usate da input in questa analisi [6].

Come già indicato precedentemente, gli scenari principali di confronto sono due, lo scenario HIGH e lo scenario LOW, utili a stabilire il margine inferiore e il margine superiore della possibile futura evoluzione di richiesta energetica.

Come più volte ricordato, l'analisi di scenario è specifica del particolare paese o area geografica, per questo motivo per ogni area sono stati stabiliti questi range sulla base della diversità delle aree in termini economici e sociali.

Si veda ad esempio il ventaglio atteso per l'Europa Occidentale (Figura 7) e lo si confronti con quello dell'Europa Orientale (Figura 8).

E' evidente che il ventaglio dell'Europa Occidentale è molto più aperto perché lo sviluppo ormai ha raggiunto un equilibrio e quindi presumibilmente non si avrà una crescita della domanda elevata (nemmeno per lo scenario HIGH) né un incremento del parco macchine nucleare così evidente, al contrario se si guarda l'Europa Orientale il ventaglio si stringe a causa della forte crescita attesa in

termini di nucleare.

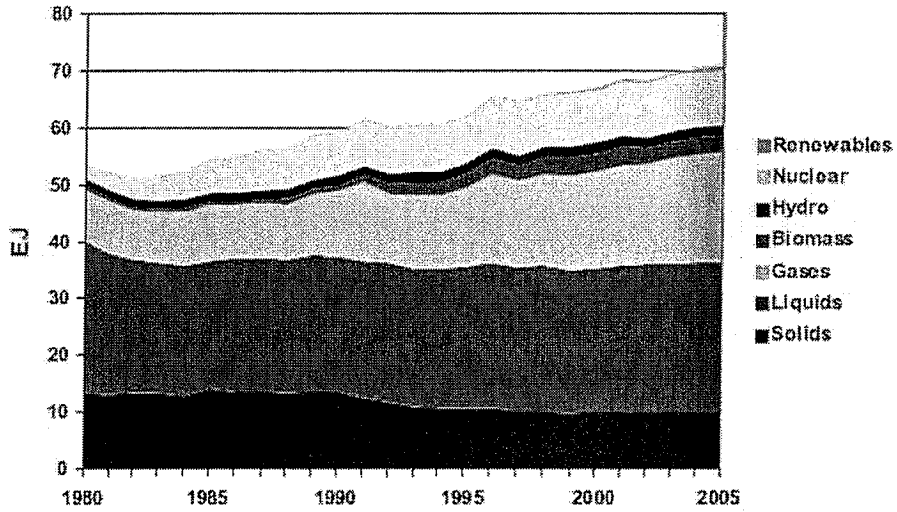


Figura 5: Dati storici (1980-2005) andamento europeo dell'uso dell'energia primaria suddivisa per fonti energetiche [6]

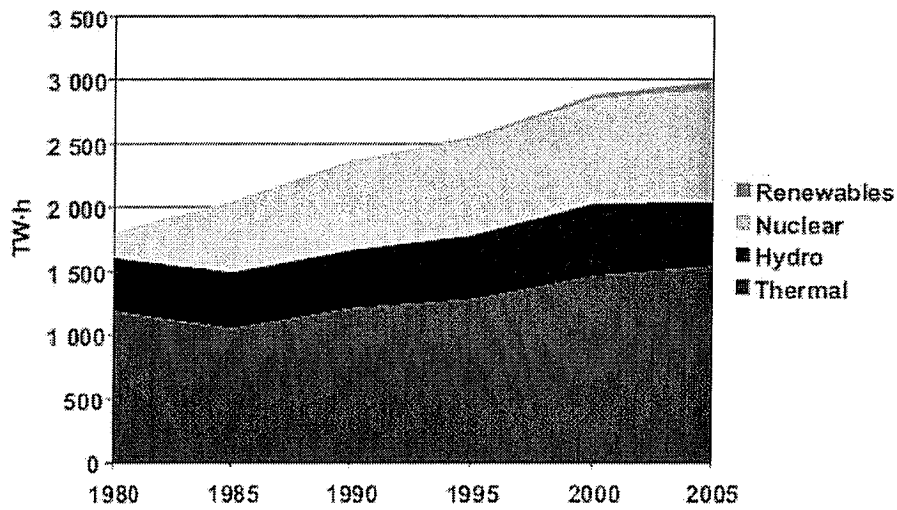


Figura 6: Dati storici (1980-2005) andamento europeo dell'energia elettrica prodotta suddivisa per fonti energetiche [6]



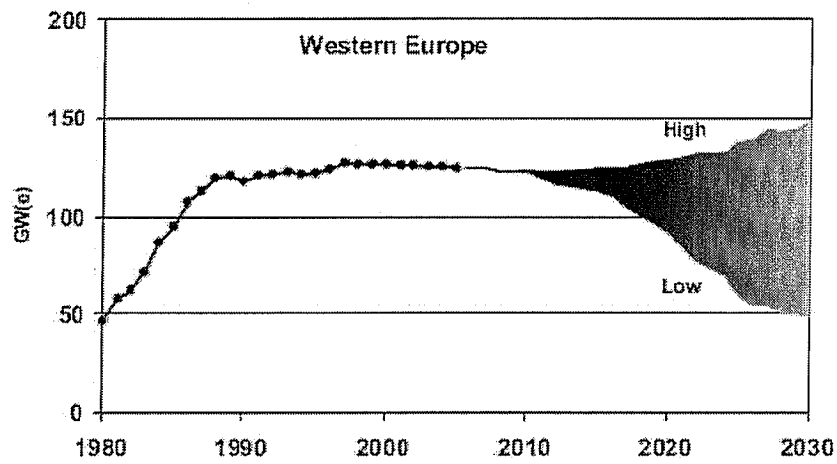


Figura 7: Stima della capacità di espansione della potenza nucleare per l'Europa Occidentale [6]

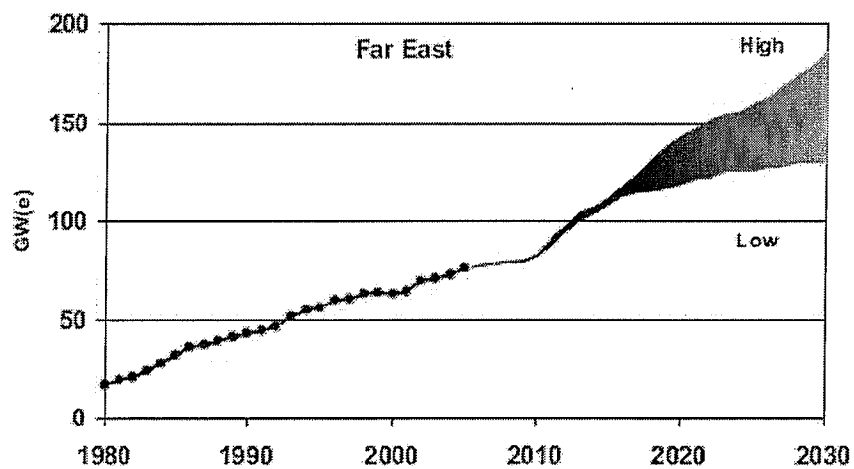


Figura 8: Stima della capacità di espansione della potenza nucleare per l'Europa Orientale [6]

E' sulla base dei dati che sono stati descritti sopra brevemente e riassunti per semplicità in Tabella 1, che è stato possibile ipotizzare degli scenari evolutivi nucleari così come verrà descritto e analizzato più avanti.

Parametri	Ratei Annui	
1997-2007		
Popolazione	0.4%	
Energia primaria	1.0%	
Energia elettrica	1.8%	
Energia nucleare	-0.1%	
Capacità nucleare	-0.4%	
Parametri	LOW	HIGH
2007-2030		
Popolazione	0.2%	
Energia primaria	0.2	0.9
Energia elettrica	1.0	2.8
Energia nucleare	-1.6	1.5
Capacità nucleare	-2.2	0.9

Tabella 1: Ratei di crescita media annui per l'Europa Occidentali dati IAEA [6]

Partendo da questi dati e dall'attuale condizione dei singoli Stati (alcuni valori significativi sono riportati in Tabella 2) è stata calcolata la domanda di energia elettrica attesa nel 2050.

Nota tale domanda, sono state introdotte alcune ipotesi circa la percentuale da coprire con il nucleare, portando ad avere l'andamento del nucleare atteso per il periodo 2008-2050. Noto l'andamento del nucleare, nota l'età dei reattori ad oggi in esercizio e noto anche lo sviluppo atteso della tecnologia di IV generazione, è stato considerato quali reattori inserire e a partire da quale anno inserirli.

Stati	Fabbisogno elettrico (TWh)	% Nucleare
2007		
Belgio	81.9	54.1%
Spagna	291.1	20.0%
Germania	576.5	27.5%
Francia	549.1	78.1%
Italia	301.6	0.0%
Europa (OECD)	3373	27.6%

Tabella 2: Produzione elettrica netta nel 2007 [12] [Dati Italia [13]]

Una volta stabiliti i dati di partenza, prima di andare ad analizzare i possibili scenari (par. 3) è utile soffermarsi sulla definizione degli indicatori significativi del settore elettrico e sul perchè è stato necessario sceglierne alcuni di riferimento nella nostra analisi.

## **2.2 Indicatori significativi del settore elettronucleare**

Per poter delineare quali sono gli indicatori di maggiore interesse in ambito elettrico si deve in ogni modo partire dal concetto che tiene in piedi tutta questa analisi e cioè dal concetto di **Sviluppo Sostenibile**.

Negli anni si sono susseguite varie definizioni di sviluppo sostenibile ma è bene far riferimento alla definizione emersa nel 1987 all'interno del 'Rapporto Brundtland Our Common Future', rapporto conclusivo della 'World Commission on Environmental Development WCED' istituita dalla Nazioni Unite nel 1983, che definisce lo sviluppo sostenibile come uno sviluppo che risponde alle necessità del presente, senza compromettere la capacità delle generazioni future di soddisfare le proprie esigenze ['a development that meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs' [14]].

Il Rapporto Brundtland è alla base anche della strutturazione dell'Agenda 21 [15] dove sono indicate le tappe fondamentali della sostenibilità, vedasi la dimensione socio economica, le problematiche ambientali, la partecipazione degli attori sociali e la messa in opera di iniziative ed azioni coordinate.

Lasciando ad altri lavori l'analisi dettagliata del concetto di sviluppo sostenibile, è necessario qui ricordare che lo sviluppo sostenibile si basa su tre grandi aree di intervento: Economia, Ambiente, Sociale. Relativamente a queste aree si andranno a definire gli indicatori fondamentali del settore elettrico ma più nel dettaglio del settore elettronucleare.

In Figura 9 è riportata la rappresentazione schematica dello sviluppo sostenibile (dove sono indicate le interazioni fra le tre aree di intervento). tale rappresentazione risale alla definizione data dalla Commissione Brundtland [14] e ripresa poi dagli organismi internazionali.

Sarà necessario quindi stabilire degli indicatori collegati agli aspetti economici, ambientali e sociali specifici del settore energetico.

E' bene evidenziare fin da ora che non esiste un set di indicatori unico ed universalmente accettato ma essi sono specifici per l'obiettivo che si vuole raggiungere. Infatti, è sulla base delle peculiarità dell'obiettivo che devono essere definiti gli indicatori in modo da evidenziarne al massimo le criticità. La difficoltà di questa analisi sta' dunque nell'arrivare ad avere una buona conoscenza del problema

tale da permettere la scelta degli indicatori più adeguati.

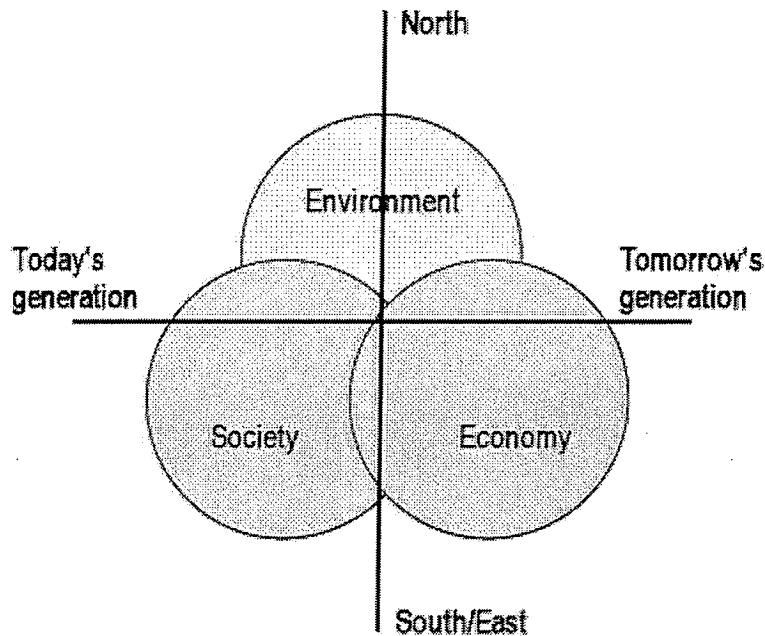


Figura 9: Rappresentazione schematica degli aspetti centrali dello sviluppo sostenibile, sulla base della definizione data dalla Commissione Brundtland [14]

Uno degli aspetti più controversi della scelta degli indicatori è la quantificabilità di essi che è strettamente legato alla disponibilità dei dati.

Facendo riferimento agli indicatori del settore elettrico/energetico che mettono insieme aspetti economici, ambientali e sociali sarà importante avere come obiettivo la valutazione comparata e sistematica dei rischi e dei benefici che le varie opzioni di fornitura di energia elettrica presentano.

Una delle pubblicazioni di riferimento in questo settore è stata rilasciata dall'IAEA nel 2005 e risulta essere particolarmente significativa proprio perchè introduce un set di 30 indicatori energetici per lo sviluppo sostenibile (suddivisi in 16 di carattere economico, 10 ambientali e 4 a carattere sociale) [16].

Per dare un esempio sulla tipologia degli indicatori, alcuni di essi sono riassunti in Tabella 3.

Per motivi di brevità non si entrerà nel dettaglio di tutti i 30 indicatori proposti, lasciando ad altri documenti internazionali tale compito [16, 17], ma ci si riferisce solo ad alcuni di essi ritenuti esemplificativi per il presente lavoro.

Dimension	Indicator	Unit
Economy	Production cost Fuel price sensitivity Availability (load factor) Geopolitical factors Energetic resource lifetime Nonenergetic resource consumption Peak load response	c/kWh Factor % Relative scale Years kg/GWh Relative scale
Environment	CO2 equivalent Change in unprotected ecosystems Land use Fatalities (Severe accident) Weight (Total waste)	tons/GWh km2/GWh m2/GWh Fatalities/GWh tons/GWh
Social	Technology job opportunities Potential (proliferation) Mortality Noise, virtual amenity Confinement time Number of fatalities per accident	Personyears/GWh Relative scale Years of life lost/GWh Relative scale Thousand of Years Fatalities/accident

Tabella 3: Set specifico di indicatori tecnologici [17]

**Indicatori Economici** - Gli indicatori economici evidenziati per il settore energetico spaziano su vari fronti. Il primo indicatore che è possibile citare è il costo totale di produzione (costo del kWh prodotto). Questo fattore non è di facile quantificazione perché le leggi del mercato non permettono agli analisti di avere a disposizione tutti i dati necessari. Una stima del range di costo del kWh prodotto a seconda delle fonti energetiche usata è riportata in Tabella 4 [18].

Costi di Produzione Elettricità [Euro/MWh]							
At 5% discount rate				At 10% discount rate			
Coal	Gas	Nuclear	Wind	Coal	Gas	Nuclear	Wind
22/48	39/56	23/36	35/90	28/59	43/59	31/53	45/125

Tabella 4: Ratei dei costi di produzione elettrica [Euro/MWh] a seconda del tasso di sconto [18]

Altri fattori economici significativi sono la 'sensibilità rispetto al prezzo del combustibile' (Tabella 5), il 'fattore di disponibilità' e le 'riserve di combustibile disponibili' (in Tabella 6 sono riportati i dati relativi alla frazione di riserve/produzione al 2005).

I fattori sopra citati rientrano nella sfera economica ma sono strettamente collegati alle analisi di scenario. Infatti, l'incidenza del prezzo del combustibile è fattore di discriminazione fra le varie fonti energetiche ed in particolar modo potrebbe far pendere la bilancia verso l'una o l'altra fonte (basti pensare all'andamento del costo del petrolio che si è avuto a cavallo fra la fine 2007 ed l'inizio del 2008 toccando il record storico di 147.27 dollari al barile l'11 luglio scorso).

Strettamente collegato alle analisi di scenario è il fattore delle riserve di combustibile disponibili allo sviluppo di una certa tecnologia perché danno una misura del periodo di tempo per il quale questa risorsa potrà essere sfruttata (si vedano ad esempio le analisi sul picco di estrazione del petrolio [19]).

Questi parametri sono molto importanti anche all'interno delle analisi di scenario perché è necessario, affinché uno scenario sia sostenibile, che le tecnologie implementate siano economicamente vantaggiose e che le risorse necessarie per implementarle siano disponibili.

A seguito di queste considerazioni, nel presente lavoro si è scelto come parametro da utilizzare per il confronto fra i vari scenari nucleari implementabili l'entità delle 'risorse di Uranio e di Plutonio' coinvolte nell'implementazione di un tale scenario. Per quanto riguarda le riserve di Uranio si è fatto riferimento ai dati presenti in letteratura e una delle fonti principali è la pubblicazione della NEA del 2008 'Uranium 2007: Resources, Production and Demand' [11]. Una stima dello stato attuale circa le riserve di Uranio assicurate (dette anche RAR 'Reasonably Assured Resources' cioè reperibili a costi inferiori ai 130\$/kgU) e circa le riserve presunte (IR 'Inferred Resources' cioè presumibilmente recuperabili a costi inferiori ai 130\$/kgU) è riportato in Tabella 7.

Coal	Gas	Nuclear		Wind/Solar
		U price	Fuel Cycle	
40	75	4	cost 15	0

Tabella 5: Impatto della duplicazione del costo del combustibile sui costi di generazione [17]

Coal	Oil	Gas	Uranium
155	41	65	85

Tabella 6: Frazione di riserve/produzione nel 2005 [17]

Regioni	RAR	IR	Totali
Europa OECD	53	49	102
Totale OECD	1455	662	2117
Totali Mondiali	3338	2131	5469

Tabella 7: Risorse di Uranio espresse in 1000 ton U [12]

**Indicatori Ambientali** - Gli indicatori ambientali sono quelli che sono stati maggiormente analizzati in quanto sono strettamente collegati al concetto principe che sta dirigendo questa analisi: cioè la mitigazione dei cambiamenti climatici e la riduzione delle emissioni di gas serra.

Uno dei principali indicatori dell'impatto ambientale globale sono le emissioni di gas serra. Grazie a questo indicatore si potranno comparare le diverse fonti energetiche, considerate complessivamente con tutta la filiera.

L'unità di misura utilizzata sono i kg CO<sub>2</sub> equivalente emessa, sotto l'ipotesi di tenere in considerazione il potenziale riscaldante di ciascuna tipologia di gas rilasciato.

I valori medi ottenuti per la lignite corrispondono a 1.2 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, che diminuiscono a 1.07 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh per il carbone. Per quanto riguarda la filiera del petrolio il valore medio è di 0.9 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh, e 0.6 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh per il gas naturale (in presenza di impianti combinati il valore diminuisce a 0.4 kgCO<sub>2</sub>eq/kWh). E' evidente, come mostrato in Figura 10, che nucleare e fonti rinnovabili hanno valori di emissione ben al di sotto di quelli relativi ai combustibili fossili (sono inferiori di ben 2 ordini di grandezza perchè si parla di 8 gCO<sub>2</sub>eq/kWh per il nucleare, 5 gCO<sub>2</sub>eq/kWh per l'idroelettrico, 11 gCO<sub>2</sub>eq/kWh per gli impianti eolici onshore, 14 gCO<sub>2</sub>eq/kWh per gli impianti eolici offshore e 60 gCO<sub>2</sub>eq/kWh per gli impianti fotovoltaici [17]).

Allo stesso modo possono essere considerate le emissioni di NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> e di particolato (PM10) perchè sono indicatori dell'impatto ambientale a livello regionale e locale. Anche in riferimento a questi indicatori il nucleare e le fonti rinnovabili rilasciano quantità inferiori di due ordini di grandezza rispetto ai combustibili fossili.

Uno dei parametri ambientali analizzato di seguito è molto significativo per quanto riguarda l'avversione alla fonte energetica nucleare. Tale indicatore è dato dai rifiuti solidi prodotti nella catena energetica.

Questo indicatore è un indicatore principe nelle analisi di scenario, perchè come già indicato una delle accuse mosse al nucleare è quella relativa alla gestione dei rifiuti, ritenuti dall'opinione pubblica di

elevata quantità (espressione non del tutto corretta visti i valori prodotti dalle altre fonti energetiche) e di elevata pericolosità (su questo aspetto verranno fatte alcune considerazioni aggiuntive nel proseguo di questo lavoro).

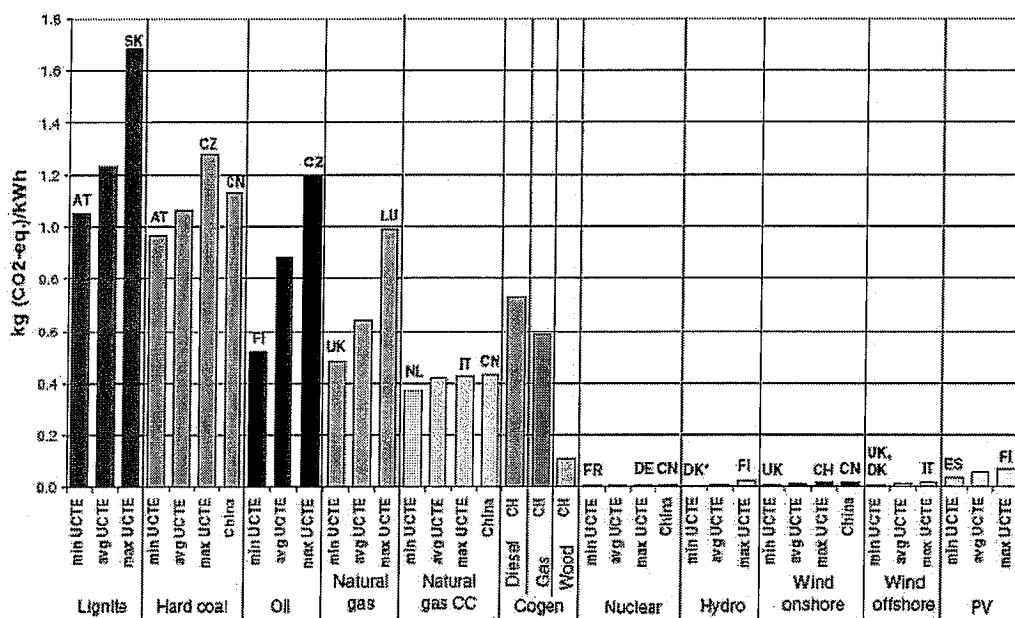


Figura 10: Emissioni di gas serra a seconda della filiera energetica selezionata espresse in kgCO<sub>2</sub>eq/kWh [17]

Per caratterizzare questo indicatore è necessario distinguere fra rifiuti solidi non radioattivi e rifiuti solidi radioattivi (questi ultimi specifici del nucleare).

Per quanto riguarda i rifiuti solidi non radioattivi è la lignite ed il carbone a produrre la maggior quantità: si parla di 0.18 kg/kWh e anche in questo caso il contributo del nucleare è veramente irrisorio se confrontato con le altre catene energetiche (vedasi Figura 11). Situazione diversa si ha per i rifiuti radioattivi dove il nucleare è il principale produttore (Figura 12).

Questo fattore è uno dei fattori maggiormente percepiti dalla popolazione come fattore negativo. Questa avversione dipende anche dal fatto che, ad oggi, la comunità scientifica non ha ancora fornito una soluzione universalmente accettata circa il trattamento definitivo dei rifiuti radioattivi coinvolti. In realtà, alcune soluzioni esistono ma sono ancora in fase di studio, per citarne un esempio basta pensare all'utilizzo dei reattori sottocritici iniettati ('Accelerator Driven System ADS') pensati come 'bruciatori di attinidi minori'.



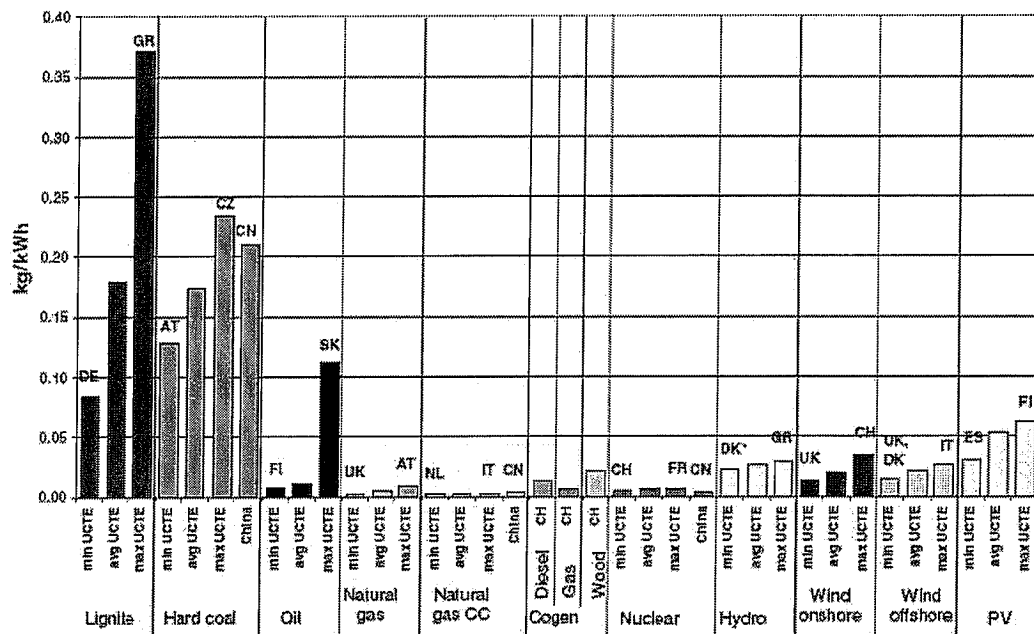


Figura 11: Produzioni di rifiuti non radioattivi per catena energetica [17]

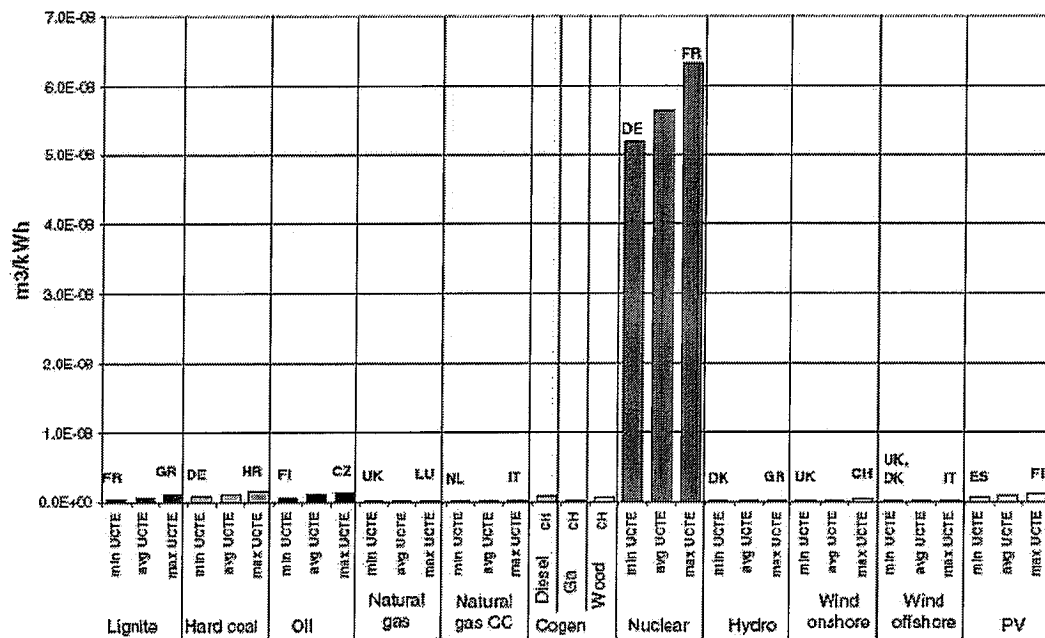


Figura 12: Produzioni di rifiuti radioattivi per catena energetica [17]

In particolare è bene però ricordare anche qui che i rifiuti radioattivi prodotti dal nucleare non hanno

tutti la stessa pericolosità né la stessa vita, infatti i tempi di dimezzamento sono diversi così come la capacità di essere assorbiti dall'organismo umano tramite inalazione od ingestione.

Se si va ad analizzare la composizione isotopica del combustibile esausto in uscita dal reattore si ha che solo una piccola percentuale è quella significativa per il lungo periodo, cioè gli 'HLW High Level Waste', la cui pericolosità è data soprattutto dalla presenza di Attinidi Minori (Nettunio, Americio e Curio) e di Plutonio (in caso non venga attuata la scelta della separazione e del riprocessamento). Tale percentuale però è piccola come si può vedere nel grafico di Figura 13 dove vengono confrontati in modo qualitativo i rifiuti tossici e i rifiuti radioattivi tenendo conto del relativo rapporto fra essi.

Per questo motivo un altro parametro utilizzato per confrontare le varie ipotesi di scenario è l'inventario dei rifiuti prodotti. In ogni scenario è stato stabilito se fare riprocessamento e separazione, del Pu degli attinidi minori e soprattutto è stato anche fissato in quale percentuale tali procedimenti verranno svolti.

**Indicatori Sociali** - La definizione degli indicatori sociali è uno degli aspetti più complessi e controversi, così come la decisione di quali aspetti includere.

Relativamente a questa problematica un lavoro di quantificazione abbastanza ampio è stato portato avanti dalla Comunità Europea attraverso il progetto integrato NEEDS [20]. I criteri adottati come basilari sono: la stabilità politica, lo sviluppo dell'accettabilità sociale, l'impatto sulla qualità del territorio, più altri componenti sociali relativi all'impatto economico e di sicurezza.

Uno degli indicatori presi in esame è la creazione del numero di posti di lavoro relativamente alla catena energetica introdotta. Maggiormente interessante, però, per la presente analisi è lo YOLL 'Years Of Life Lost' cioè gli anni di vita persi a causa del normale esercizio dell'impianto (un esempio relativo alla Germania è riportato in Figura 14). Questo indicatore è ritenuto importante a causa del suo stretto legame con la percezione da parte della popolazione di una certa fonte energetica.

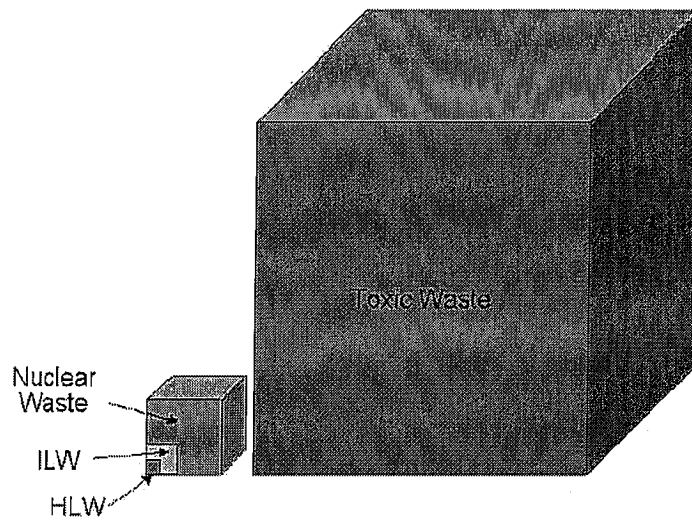


Figura 13: Confronto qualitativo fra i rifiuti prodotti dalle attività industriali ed il nucleare

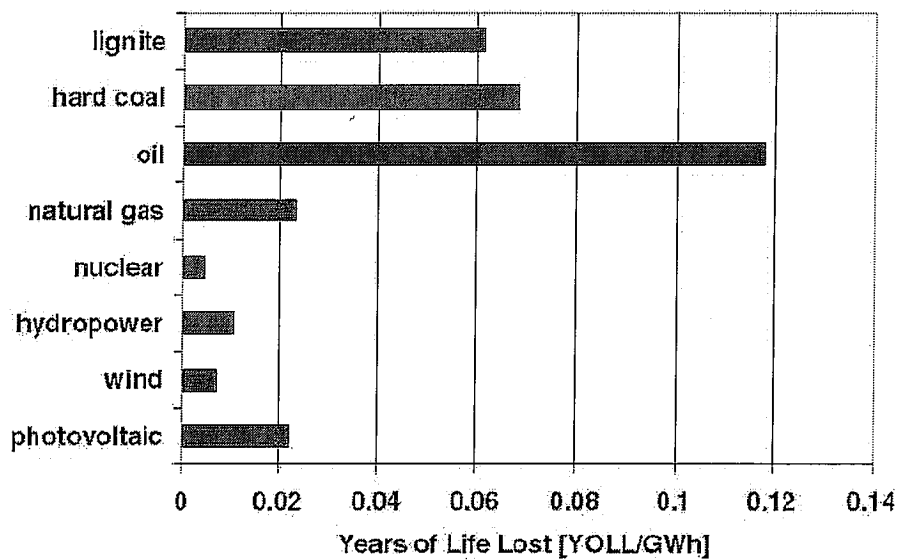


Figura 14: Mortalità associata alle condizioni di funzionamento normale in 2000, dati relativi alla Germania [17]

Come è stato in parte già accennato, un parametro sociale di particolare interesse è però il confinamento dei rifiuti, che significa per quanti anni sono costretto a garantire il confinamento delle scorie del processo produttivo.

Si è già parlato precedentemente dei volumi coinvolti, che insieme a questo parametro mostrano chiaramente uno dei punti cruciali che generano opposizione al nucleare.

Entrano qui in gioco i tempi di decadimento dei prodotti di fissione, in particolar modo degli Attinidi Minori, che sono molto elevati, cioè tali da avere un tempo di ritorno al livello di miniera (tempo necessario al ritorno delle condizioni presenti naturalmente) pari a  $2 \times 10^5$  anni.

Relativamente a questo aspetto è interessante confrontare le varie strategie ipotizzabili, considerando la radiotossicità dello SNF (Spent Nuclear Fuel) e quindi il tempo di raggiungimento di un livello di riferimento, come termine di paragone.

Consapevoli del fatto che qualunque strategia verrà implementata, sarà sempre necessario avere un deposito geologico in profondità, un ulteriore parametro che è stato considerato è l'andamento nel tempo del calore di decadimento dei rifiuti nucleari, parametro importante per quanto riguarda il progetto del deposito e l'integrità strutturale di esso.

Ulteriori importanti parametri sociali sono il rischio di proliferazione e la prevenzione dagli incidenti severi; anch'essi infatti influenzano l'accettabilità del nucleare. Nella presente analisi non si è entrati nel dettaglio relativamente a questi parametri perché la scelta fatta di utilizzare reattori di IV generazione per simulare gli scenari di riferimento riduce molto la necessità di questa valutazione. Infatti, i reattori scelti rispettano già, fin dalla fase progettuale, i goals individuati per uno sviluppo sostenibile [7].

### **2.3 Indicatori adottati per l'analisi di scenario**

Con riferimento a quanto evidenziato sopra, è possibile individuare come indicatori specifici delle analisi di scenario sviluppate nel presente lavoro, i seguenti 4 parametri:

- Risorse di Uranio e Plutonio coinvolte;
- Radiotossicità del combustibile esausto (riprocessato e non);
- Volumi di combustibile esausto da mandare in deposito e loro composizione isotopica;
- Calore di decadimento del combustibile esausto.

Il primo parametro è significativo perché molti studi attualmente sono in corso per decretare le quantità di Uranio che sarà possibile ancora estrarre ad un costo ragionevole ( $< 130\$/\text{kgU}$ ) ed in particolare

perché, se si vuole sviluppare reattori veloci sarà necessario assicurarsi il quantitativo minimo di Plutonio per lo startup, nell'ottica poi di giungere alle condizioni di equilibrio dove i reattori autofertilizzanti (rapporto di conversione  $\geq 1$ ) riescono ad autosostenersi producendo autonomamente la quantità di fissile necessaria al proprio funzionamento. A questo parametro è quindi significativo per vedere se uno scenario è perseguibile oppure no.

Gli altri tre parametri invece, come più volte sottolineato, sono stati scelti perché sono i fattori che maggiormente influenzano l'opinione pubblica circa l'accettabilità o meno del nucleare.

Può essere interessante esaminare il concetto di radiotossicità. Esistono in letteratura varie definizioni di radiotossicità, ma quella adottata nel presente lavoro è la Radiotossicità come 'Stima della dose assorbita per unità di attività della sostanza ingerita o inalata ed espressa o in Sv/Bq (DPUI) o in termini di cancer dose (CD)'.

La scelta deriva dal fatto che usando questa definizione si ha l'indipendenza dal corpo di leggi considerato e dalla misura di livello di riferimento assunta [21, 22].

I coefficienti utilizzati per questa valutazione sono quelli presenti nella pubblicazione n°72 dell'International Committee on Radiological Protection del 1996 (ICRP 72 [23]); coefficienti a cui fa riferimento la direttiva Europea 96/29/EURATOM, che poi a sua volta è stata recepita nelle varie leggi nazionali.

Questi coefficienti vengono tenuti aggiornati dall'ICRP, infatti nel 2007 è uscita una nuova pubblicazione, ICRP 103 [24], che pur mantenendo i principi fondamentali della radioprotezione (giustificazione, ottimizzazione e limitazione delle dosi) aggiorna i fattori di peso relativi alle differenti tipologie di radiazioni ionizzanti e ai vari tessuti del corpo umano 'update the radiation and tissue weighting factors in the quantities equivalent and effective dose and update the radiation detriment, based on the latest available scientific information of the biology and physics of radiation exposure'.

L'interesse per il concetto di radiotossicità deriva dal fatto che molto spesso l'efficienza di bruciamento degli attinidi minori e dei prodotti di fissione viene presentata in termini di radiotossicità residua.

Strettamente collegato al concetto di radiotossicità c'è il concetto di livello di riferimento, generalmente assunto come il livello di miniera e cioè il livello di radiotossicità del minerale di uranio che si trova attualmente in natura. Questo valore viene messo in relazione con l'evoluzione del combustibile irraggiato e permette di determinare il tempo di pareggio (fra radiotossicità naturale e radiotossicità 'artificiale' del combustibile scaricato dal reattore). E' sul tempo di pareggio con il livello di miniera che viene fatta l'opposizione al nucleare (visto l'impatto che si avrà su molte generazioni future) ma sempre sul tempo di pareggio stanno lavorando i tecnici del settore, cercando di ridurlo

tramite tecniche di separazione, riprocessamento, e trasmutazione dei prodotti di fissione a lunga vita. Per fare un esempio di che cosa è una curva di radiotossicità, si riporta di seguito l'andamento della radiotossicità dello Spent Nuclear Fuel estratto da un PWR (1000 MWe), con arricchimento iniziale di 4.3 % in  $^{235}\text{U}$  e burn up allo scarico di 50 GWd/tonHM (Figura 15). I coefficienti di radiotossicità usati sono relativi all'ICRP72.

La scelta poi dei tre indicatori (radiotossicità, calore di decadimento e volumi coinvolti) deriva anche da alcune considerazioni circa il deposito geologico. Infatti qualunque sia la strategia che verrà intrapresa sarà necessario considerare anche il deposito come ultima facility. In fase di progettazione sarà dunque importante stabilire i volumi coinvolti e il calore di decadimento dei rifiuti radioattivi per poter analizzare il danneggiamento possibile delle barriere, per poter progettare in maniera adeguata il deposito per il lungo termine.

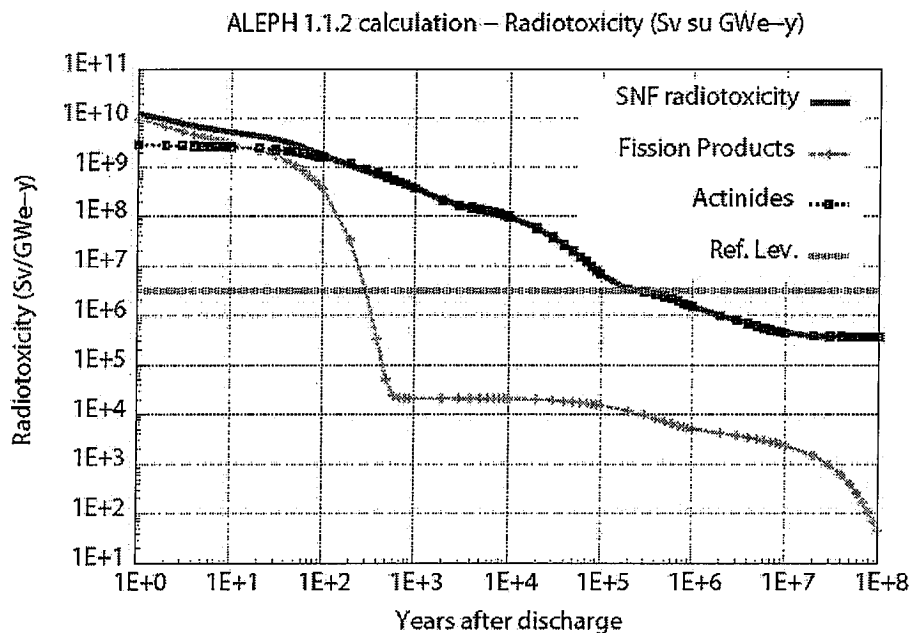


Figura 15: Andamento della radiotossicità dello SNF estratto da un PWR-1000MWe con burn-up allo scarico di 50 GWd/tonHM [22]

### 3 Primi risultati ottenuti

Dopo aver presentato la metodologia adottata e le basi teoriche dell'analisi, è interessante iniziare a vedere alcune applicazioni. Come indicato nell'introduzione l'idea è stat di riferirsi a tre grandi aree di

interesse Belgio-Germania-Spagna, Francia ed Italia così suddivise sulla base delle scelte di politica energetica.

In questa prima applicazione è fatto riferimento al Belgio, in quanto Paese con una forte frazione energia elettrica prodotta dal nucleare (5700 MWe installati che portano attualmente ad un 35 % di produzione elettrica tramite nucleare). Ad oggi, infatti, il Belgio ha installati sul proprio territorio 7 reattori della tipologia PWR, suddivisi in due siti dedicati (Doel e Tihange).

Il Belgio, però, ha deciso con una legge regia del 2003 di interrompere l'utilizzo del nucleare adottando una politica energetica di graduale 'phase-out' dalla produzione elettrica nucleare con la chiusura progressiva a partire dal 2015 (chiusura dei reattori più vecchi) dei sette reattori presenti sul territorio nazionale (la chiusura dell'ultimo reattore sarebbe allora prevista per il 2025).

Questa decisione politica presa dal Belgio dovrà probabilmente essere rivista perché è vincolata al mantenimento dell'indipendenza energetica del Paese e al rispetto degli accordi presi in termini di riduzione dei gas inquinanti sottoscrivendo il protocollo di Kyoto.

Entrando più nel dettaglio del lavoro fatto, una volta noti i parametri di crescita della domanda energetica (dati relativi ai valori medi indicati dall'IAEA per l'Europa [6]) si sono fatte alcune ipotesi sulla frazione di nucleare (riduzione del 2.2% annuo e aumento dello 0.9% annuo, rispettando i valori presentati dall'IAEA) e sotto tali ipotesi sono stati costruiti gli scenari. In alcune tipologie è stata presa inoltre in considerazione la possibilità di avere il PLEX cioè il prolungamento della vita del reattore da 40 a 60 anni, possibilità che molti Stati stanno prendendo in considerazione per la gestione energetica a breve termine.

In Figura 16 e in Figura 17 sono riportate rispettivamente l'andamento di potenza nucleare installata in Belgio (considerato la chiusura degli impianti dopo 40 anni di esercizio) e foglio di calcolo Excel preparato per poter svolgere le elaborazioni che verranno descritte successivamente.

Una volta stabilito il punto di partenza sono stati implementati uno scenario LOW ed uno HIGH per il Belgio. Rimane però necessario iniziare con una descrizione del caso in cui si verifichi la 'phaseout' dalla produzione elettricanucleare.

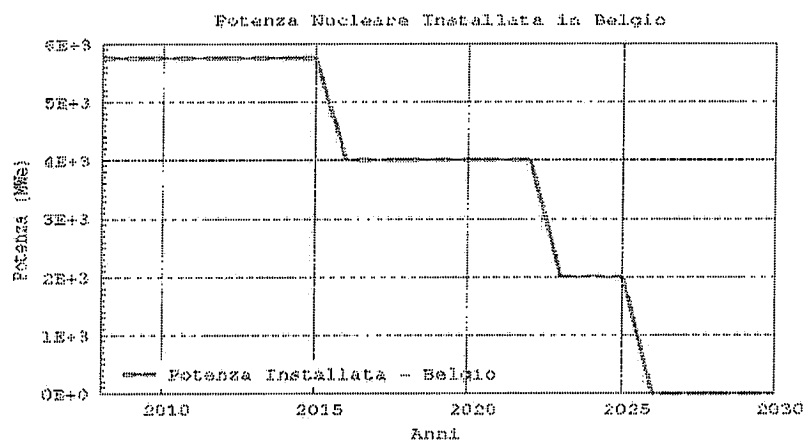


Figura 16: Situazione dei reattori attualmente installati in Belgio. Andamento della potenza installata in caso di phase-out, Periodo 2008-2030

### 3.1 Phase-out

Come già indicato, questo tipo di scenario si può verificare se la decisione presa con la legge del 2003 verrà attuata a compimento. Se così fosse si avrebbe una graduale riduzione della potenza installata fino al 2025 per poi passare, con un salto netto, allo 0% a seguito della chiusura degli ultimi due reattori (Doel4 e Tihange3).

E' stato simulato questo scenario con l'ausilio del Codice NFCSS della IAEA [25]. Il codice NFCSS è un codice di 'Fuel Cycle', cioè un codice capace di simulare differenti cicli del combustibile, a partire dall'estrazione del minerale fino al deposito geologico profondo, che vedono l'implementazione di diverse tipologie di reattori. Si tratta di un codice sufficientemente flessibile perché l'utente può inserire nuovi reattori e nuovi tipi di combustibile, oltre a quelli forniti di default, solo fornendo al codice opportuni valori di riferimento (cfr. un'applicazione di questo più avanti).

Per definire lo scenario belga in condizioni di phase-out sono stati introdotti singolarmente i sette reattori in esercizio, tenendo conto per ognuno di essi dell'arricchimento iniziale del combustibile, della lunghezza del ciclo di irraggiamento, del burnup medio allo scarico, del fattore di carico, delle perdite durante l'arricchimento e di tanti altri parametri che caratterizzano la fisica del reattore (cross - sections, composizioni isotopiche, ...).



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Anni	Doel1	Doel2	Doel3	Doel4	Tihange1	Tihange2	Tihange3	MW installati	
2	2008	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
3	2009	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
4	2010	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
5	2011	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
6	2012	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
7	2013	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
8	2014	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
9	2015	392.5	392.5	1.006	985	962	1.008	1.015	5761	
10	2016	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
11	2017	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
12	2018	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
13	2019	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
14	2020	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
15	2021	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
16	2022	0	0	1.006	985	0	1.008	1.015	4014	
17	2023	0	0	0	985	0	0	1.015	2000	
18	2024	0	0	0	985	0	0	1.015	2000	
19	2025	0	0	0	985	0	0	1.015	2000	
20	2026	0	0	0	0	0	0	0	0	
21	2027	0	0	0	0	0	0	0	0	
22	2028	0	0	0	0	0	0	0	0	
23	2029	0	0	0	0	0	0	0	0	
24	2030	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 17: Situazione dei reattori attualmente installati in Belgio. Foglio di calcolo Excel usato per modellizzare lo scenario, Periodo 2008-2030

In Figura 18 è riportato l'andamento della energia prodotta dal parco macchine belga (circa 40000 GWh) mentre in Figura 19 è riportato l'andamento della potenza installata.

Quest'ultimo andamento ottenuto tramite il codice NFCSS è sostanzialmente uguale a quanto evidenziato e presentato in Figura 16. Il codice NFCSS può fornire anche parametri relativi ai flussi massivi tra le varie facility. Può essere particolarmente interessante vedere l'andamento del combustibile scaricato dai reattori (Figura 20) o lo SNF accumulato (Figura 21) nel periodo 2008-2030.

In questa modellizzazione non si è tenuto conto dello SNF già accumulato negli anni passati di esercizio, tale valore risulta essere pari a circa 980 tonHM attualmente in pool e in interim storage di cui solo una piccolissima parte è stata riprocessata (i dati sono tratti dall'International Nuclear Safety Center (INSC) che opera sotto la guida del U.S. Department of EnergyDOE [26]). Quella brevemente presentata sopra è la situazione attesa in caso si abbia la phase-out dalla produzione nucleare. Si

possono adesso analizzare possibili alternative in caso di probabile revisione di questa decisione.

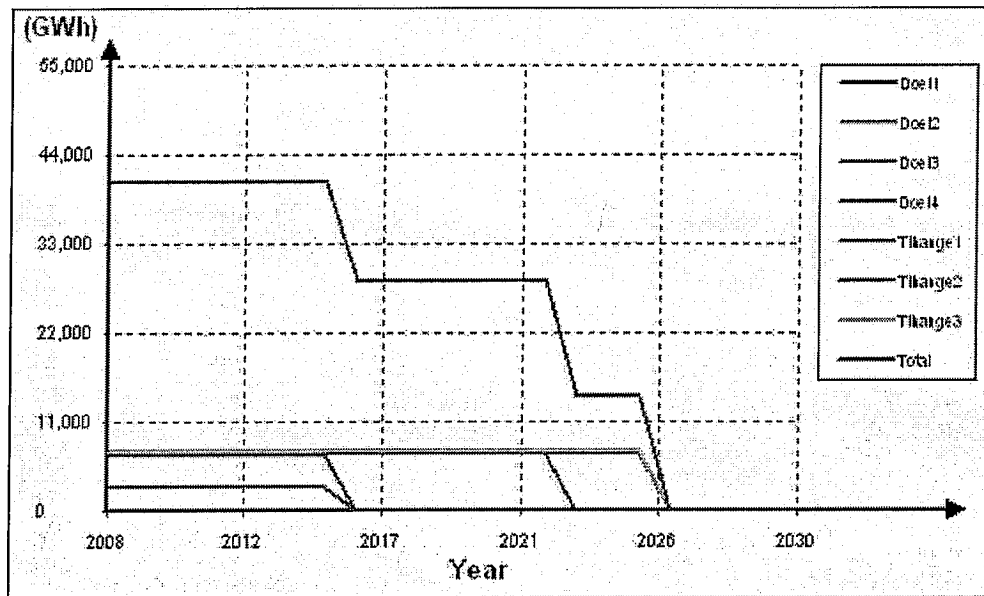


Figura 18: Andamento dell'energia prodotta dal parco macchine del Belgio - Scenario di phase-out [by NFCSS-IAEA]

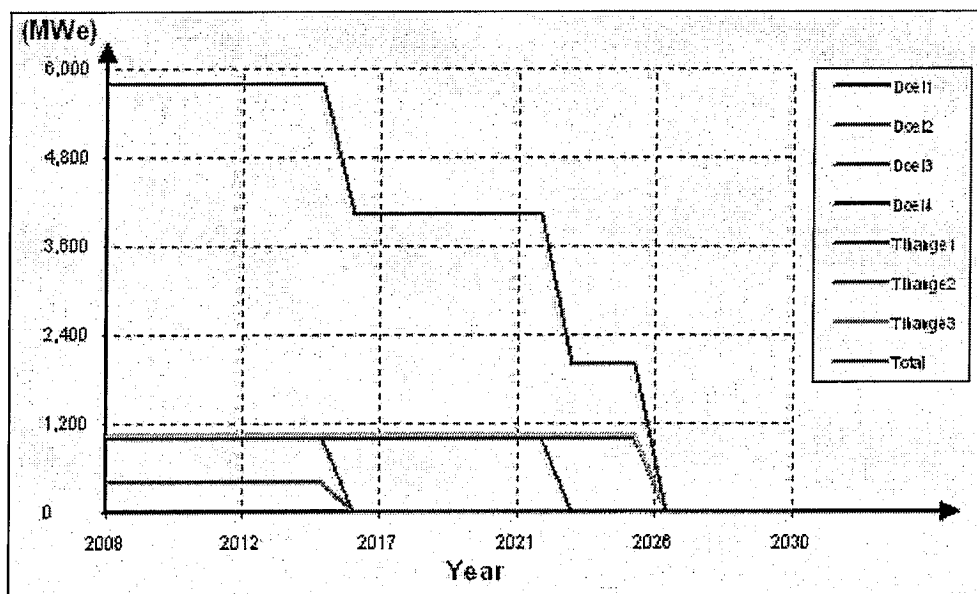


Figura 19: Andamento della potenza installata nel parco macchine del Belgio - Scenario di phase-out [by NFCSS-IAEA]

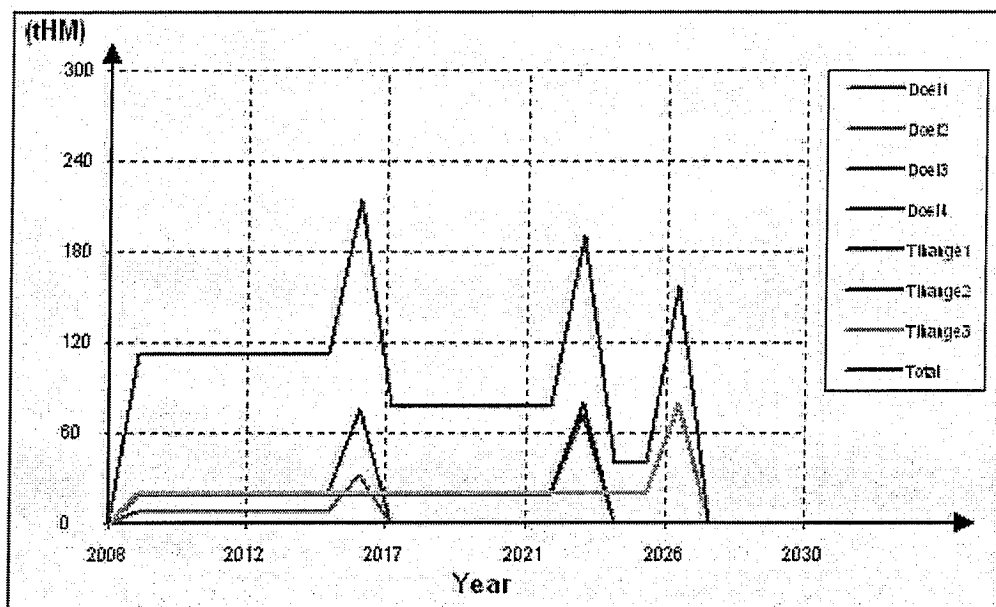


Figura 20: Andamento dello Spent Nuclear Fuel scaricato dal Parco macchine Belga - Scenario di phase-out [by NFCSS-IAEA]

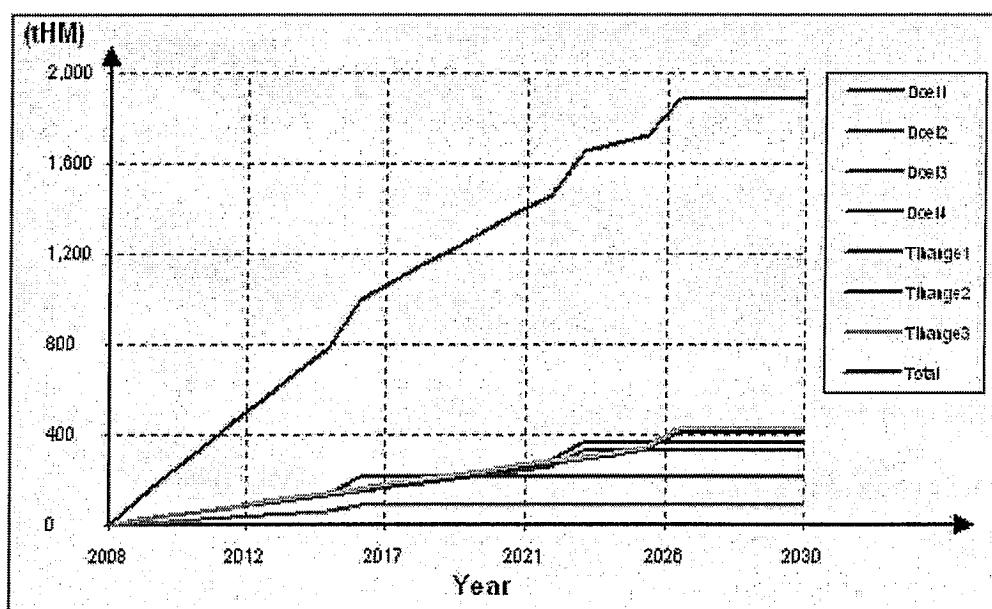


Figura 21: Andamento dello Spent Nuclear Fuel accumulato dal Parco macchine Belga - Scenario di phase-out [by NFCSS-IAEA]

### 3.2 Scenario LOW

I dati alla base dello scenario LOW implementato sono relativi alla crescita ragionevolmente più ridotta attesa della potenza installata e al relativo andamento del nucleare.

In particolare si è considerato:

- 1% di crescita annua della potenza installata [20082050].
- 2.2% di riduzione del nucleare installato a partire dal 2015, anno di chiusura dei primi reattori entrati in esercizio in Belgio (Doel1, Doel2 e Tihange1 con potenza complessiva di 1747 MWe).

Sotto queste ipotesi si ottiene l'andamento della potenza nel periodo 2008-2050 riportato in Tabella 8.

Anno	MWe Nucleari	MWe Totali	Fraz. Nucleare	Anno	MWe Nucleari	MWe Totali	Fraz. Nucleare
2008	5761.00	16182.58	0.3560	2030	4126.49	20142.72	0.2049
2009	5761.00	16344.41	0.3525	2031	4035.71	20344.15	0.1984
2010	5761.00	16507.85	0.3490	2032	3946.92	20547.59	0.1921
2011	5761.00	16672.93	0.3455	2033	3860.09	20753.06	0.1860
2012	5761.00	16839.66	0.3421	2034	3775.17	20960.59	0.1801
2013	5761.00	17008.06	0.3387	2035	3692.11	21170.20	0.1744
2014	5761.00	17178.14	0.3354	2036	3610.89	21381.90	0.1689
2015	5761.00	17349.92	0.3320	2037	3531.45	21595.72	0.1635
2016	5634.26	17523.42	0.3215	2038	3453.76	21811.68	0.1583
2017	5510.30	17698.65	0.3113	2039	3377.77	22029.80	0.1533
2018	5389.08	17875.64	0.3015	2040	3303.46	22250.09	0.1485
2019	5270.52	18054.40	0.2919	2041	3230.79	22472.59	0.1438
2020	5154.57	18234.94	0.2827	2042	3159.71	22697.32	0.1392
2021	5041.17	18417.29	0.2737	2043	3090.19	22924.29	0.1348
2022	4930.26	18601.46	0.2650	2044	3022.21	23153.54	0.1305
2023	4821.79	18787.48	0.2566	2045	2955.72	23385.07	0.1264
2024	4715.72	18975.35	0.2485	2046	2890.70	23618.92	0.1224
2025	4611.97	19165.11	0.2406	2047	2827.10	23855.11	0.1185
2026	4510.51	19356.76	0.2330	2048	2764.90	24093.66	0.1148
2027	4411.28	19550.32	0.2256	2049	2704.08	24334.60	0.1111
2028	4314.23	19745.83	0.2185	2050	2644.59	24577.95	0.1076
2029	4219.31	19943.29	0.2116				

Tabella 8: Andamento del totale della potenza installata per produzione elettrica, della potenza nucleare installata e della frazione di nucleare in Belgio fra il 2008 e il 2050 Scenario LOW

Come è evidente dai dati (e ancor di più da Figura 22) la frazione di nucleare sul totale diminuisce pesantemente passando dal 35.3% nel 2008 al 20.5% nel 2030 fino ad arrivare al 10.8% nel 2050.

In ogni modo però è necessario andare ad introdurre, a partire dal 2015 reattori innovativi nello scenario che permettano di coprire tale fabbisogno energetico.

Una delle possibili soluzioni analizzate, nel caso in cui i reattori vengano chiusi dopo 40 anni di esercizio, è quella di introdurre nel parco macchine belga tre EPR da 1600 MWe a sostituzione dei reattori presenti oggi.

Si è ipotizzato allora l'introduzione degli EPR a partire dal 2016 (EPR1), 2023 (EPR2) e 2026 (EPR3), così come riportato in Figura 23.

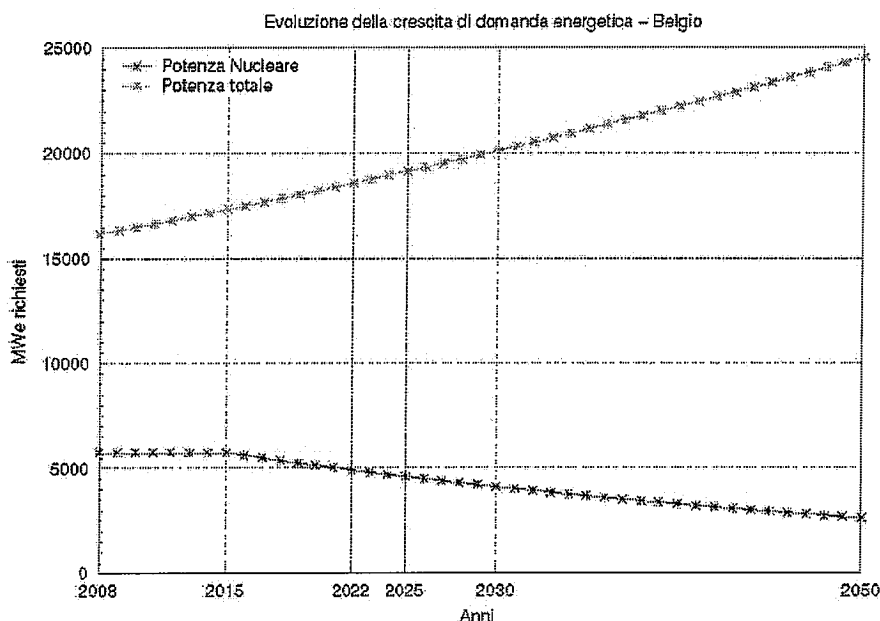


Figura 22: Andamento del totale della potenza installata per produzione elettrica, della potenza nucleare installata e della frazione di nucleare in Belgio fra il 2008 e il 2050 - Scenaric LOW

In questa ipotesi si avrà un andamento della potenza nucleare installata che subirà una diminuzione non omogenea ma funzione del momento temporale in cui verranno sostituiti i reattori.

Anche questa ipotesi di scenario è stata simulata grazie all'aiuto del codice NFCSS dell'IAEA ottenendo l'andamento di potenza installata atteso (Figura 24) e dell'energia prodotta (Figura 25).

E' possibile anche in questo caso determinare l'andamento del combustibile esausto scaricato, l'accumulo di esso nel deposito ma non ci sono grandi differenze dal punto di vista concettuale rispetto al caso di phaseout, perchè non è stato simulato l'adozione di nessun tipo di riprocessamento.

The screenshot shows an Excel spreadsheet titled 'Belgio sostituzione.xls'. The data is organized in columns A through L. Column A represents the year from 2008 to 2050. Columns B through E represent four different 'Doel' (Goal) categories, with values generally increasing from 392.5 to 985. Columns F through H represent three 'Tihange' categories, with values generally increasing from 962 to 1,015. Columns I through L represent three 'EPR' categories, with values generally increasing from 1,600 to 1,800. The spreadsheet shows a steady progression of values over time, indicating a planned replacement or expansion of nuclear capacity.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Anni	Doel1	Doel2	Doel3	Doel4	Tihange1	Tihange2	Tihange3	EPR1	EPR2	EPR3	
2	2008	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
3	2009	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
4	2010	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
5	2011	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
6	2012	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
7	2013	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
8	2014	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
9	2015	392.5	392.5	1,006	985	962	1,008	1,015	0	0	0	
10	2016	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
11	2017	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
12	2018	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
13	2019	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
14	2020	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
15	2021	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
16	2022	0	0	1,006	985	0	1,008	1,015	1,600	0	0	
17	2023	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	0	
18	2024	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	0	
19	2025	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	0	
20	2026	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
21	2027	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
22	2028	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
23	2029	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
24	2030	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
25	2031	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
26												
27												
28	2045	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
29	2046	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
30	2047	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
31	2048	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
32	2049	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	
33	2050	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	

Figura 23: Strategia di sostituzione degli attuali reattori nucleari con reattori di III generazione, tipologia EPR - Scenario LOW

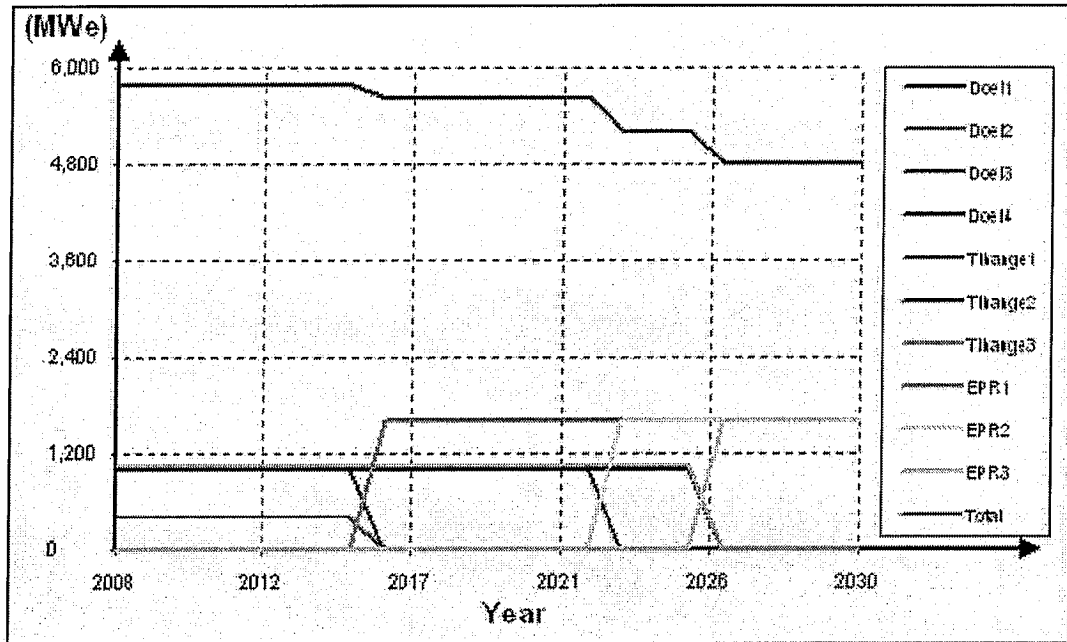


Figura 24: Andamento della Potenza nucleare installata - Scenario LOW - Belgio [by NFCSS-IAEA]

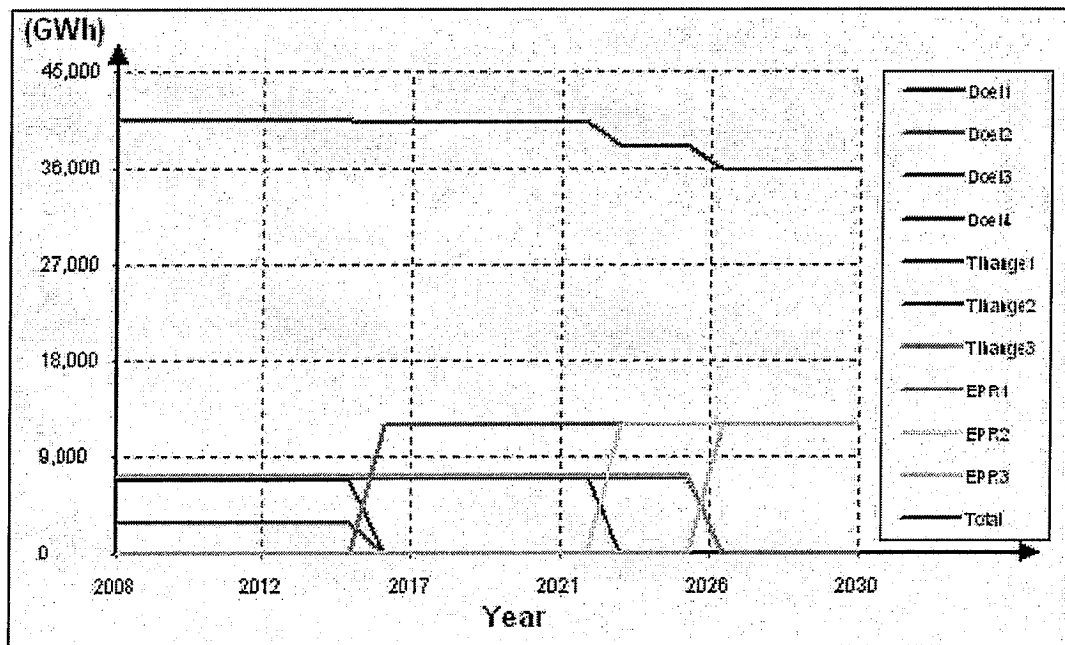


Figura 25: Andamento della Energia prodotta con il nucleare - Scenario LOW - Belgio [by NFCSS-IAEA]

Particolare interessante però può essere quanto indicato nella Figura 26 che mostra l'andamento della richiesta di Uranio per poter sostenere il ciclo. A parte i dati iniziali, intorno al 2008, dove è stato supposto per semplicità l'inizio dello scenario e quindi il picco iniziale non rispecchia la reale situazione, si vede bene che alla partenza dei tre EPR si ha un picco di richiesta di Uranio e dunque di combustibile arricchito.

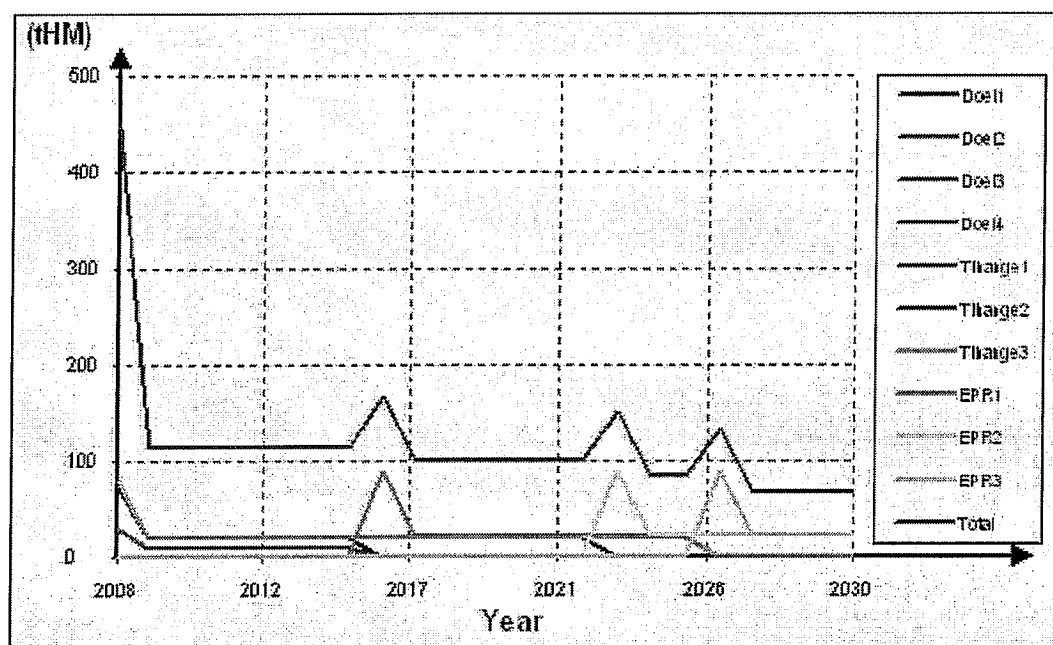


Figura 26: Andamento del combustibile fresco richiesto per il sostentamento del ciclo - Scenario LOW - Belgio [by NFCSS-IAEA]

Di seguito, solo per completezza, sono riportati alcuni degli schemi a blocchi, rappresentativi del fuel cycle, forniti dal codice. E' possibile richiedere questo schema, dove sono presenti i flussi massivi per ogni anno simulato. E' stato scelto di mettere a confronto il 2008 e il 2024, rispettivamente come punto di partenza ed anno significativo dove alcuni dei reattori attualmente in esercizio permangono in esercizio e due dei tre EPR sono già in funzione.

### 3.3 Scenario HIGH

Analogamente a quanto fatto per lo scenario LOW, è necessario ricostruire un'ipotesi anche per lo scenario HIGH, i cui dati di riferimento questa volta sono:

- 2.8% di crescita annua della potenza installata [2008-2050]



- 0.9% di crescita del nucleare installato a partire dal 2015, anno di chiusura dei primi reattori entrati in esercizio in Belgio (Doel1, Doel2 e Tihange1 con potenza complessiva di 1747 MWe).

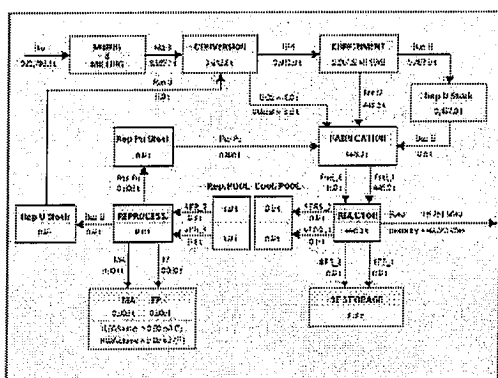


Figura 27: Schema a blocchi fuel cycle scenario simulato - anno 2008 - Scenario LOW - Belgio [by NFCSS-IAEA]

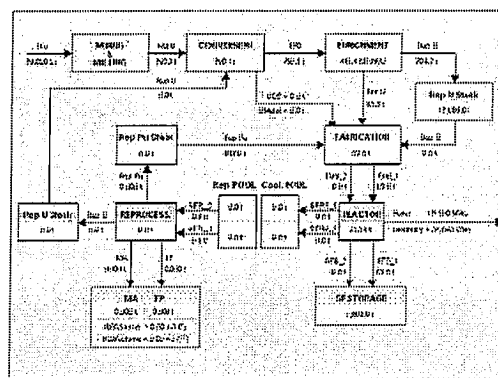


Figura 28: Schema a blocchi fuel cycle scenario simulato - anno 2024 - Scenario LOW - Belgio [by NFCSS-IAEA]

L'andamento della potenza in queste ipotesi è quello riportato in Tabella 9 e vede l'introduzione di quattro EPR (rispettivamente 1 nel 2016, 2 nel 2023 ed 1 nel 2026) e di due reattori veloci refrigerati a Piombo (nella fattispecie abbiamo considerato ELSY European Lead cooled SYstem) da 600 MWe ciascuno da inserire nello scenario a partire dal 2036, data entro la quale si pensa ottimisticamente che i reattori veloci possano essere in funzione.

Come è evidenziato in Figura 29 ed in Tabella 9 si ha un aumento della potenza nucleare installata passando dai 5700 MWe (2008) ai 7882 MWe (2050), in tale valore sono compresi anche la sostituzione e il rinnovo dei reattori ad oggi in esercizio.

Seppur l'aumento sia non indifferente, la frazione di nucleare sul totale tende a diminuire, a causa del grande incremento dell'energia elettrica richiesta, e passa dal 35.6% del 2008 ai 22.2% del 2030 per arrivare ai 15.3% del 2050.

Per poter coprire questi andamenti l'ipotesi di sostituzione dei reattori adottata, è quella riportata in Figura 30.

L'andamento allora della potenza installata sul territorio belga è quello riportato in Figura 31, ottenuto tramite la simulazione dello scenario attraverso il codice NFCSS.

In termini invece di energia prodotta l'andamento è quello di Figura 32. La Figura 33 evidenzia che il

riprocessamento del Pu ha inizio a partire dal 2044, dopo che il combustibile è stato irraggiato nel reattore ELSY1.

Anno	MWe Nucleari	MWe Totali	Fraz. Nucleare	Anno	MWe Nucleari	MWe Totali	Fraz. Nucleare
2008	5761.00	16182.58	0.3560	2030	6589.70	29709.57	0.2218
2009	5761.00	16635.70	0.3463	2031	6649.00	30541.44	0.2177
2010	5761.00	17101.50	0.3369	2032	6708.84	31396.60	0.2137
2011	5761.00	17580.34	0.3277	2033	6769.22	32275.71	0.2097
2012	5761.00	18072.59	0.3188	2034	6830.15	33179.43	0.2059
2013	5761.00	18578.62	0.3101	2035	6891.62	34108.45	0.2021
2014	5761.00	19098.82	0.3016	2036	6953.64	35063.49	0.1983
2015	5761.00	19633.59	0.2934	2037	7016.23	36045.26	0.1947
2016	5812.85	20183.33	0.2880	2038	7079.37	37054.53	0.1911
2017	5865.16	20748.46	0.2827	2039	7143.09	38092.06	0.1875
2018	5917.95	21329.42	0.2775	2040	7207.37	39158.64	0.1841
2019	5971.21	21926.64	0.2723	2041	7272.24	40255.08	0.1807
2020	6024.95	22540.59	0.2673	2042	7337.69	41382.22	0.1773
2021	6079.18	23171.73	0.2624	2043	7403.73	42540.92	0.1740
2022	6133.89	23820.53	0.2575	2044	7470.36	43732.07	0.1708
2023	6189.10	24487.51	0.2527	2045	7537.60	44956.56	0.1677
2024	6244.80	25173.16	0.2481	2046	7605.43	46215.35	0.1646
2025	6301.00	25878.01	0.2435	2047	7673.88	47509.38	0.1615
2026	6357.71	26602.59	0.2390	2048	7742.95	48839.64	0.1585
2027	6414.93	27347.46	0.2346	2049	7812.63	50207.15	0.1556
2028	6472.66	28113.19	0.2302	2050	7882.95	51612.95	0.1527
2029	6530.92	28900.36	0.2260				

Tabella 9: Andamento del totale della potenza installata e della frazione del nucleare in Belgio fra il 2008 e il 2005 Scenario HIGH

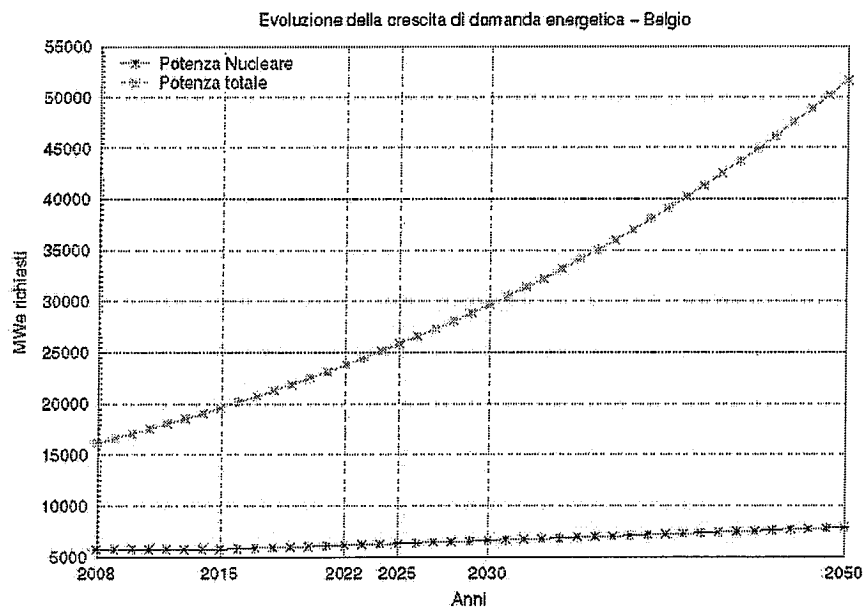


Figura 29: Andamento del totale della potenza installata e della frazione del nucleare in Belgio fra il 2008 e il 2050 - Scenario HIGH

1	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
2	Anni	Doel1	Doel2	Doel3	Doel4	Tharge1	Tharge2	Tharge3	EPR1	EPR2	EPR3	EPR4	ELSY	ELSY
3	2008	392,5	392,5	1,000	985	962	1,000	1,015	0	0	0	0	0	0
4	2009	392,5	392,5	1,000	985	962	1,000	1,015	0	0	0	0	0	0
5														
6	2015	392,5	392,5	1,000	985	962	1,000	1,015	0	0	0	0	0	0
7	2016	0	0	1,000	985	0	1,000	1,015	1,600	0	0	0	0	0
8	2017	0	0	1,000	985	0	1,000	1,015	1,600	0	0	0	0	0
9														
10	2022	0	0	1,000	985	0	1,000	1,015	1,600	0	0	0	0	0
11	2023	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	1,600	0	0	0
12	2024	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	1,600	0	0	0
13	2025	0	0	0	985	0	0	1,015	1,600	1,600	1,600	0	0	0
14	2026	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
15	2027	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
16	2028	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
17	2029	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
18	2030	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
19														
20														
21	2035	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	0	0
22	2036	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	0
23	2037	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	0
24														
25	2044	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	0
26	2045	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600
27	2046	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600
28	2047	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600
29	2048	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600
30	2049	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600
31	2050	0	0	0	0	0	0	0	1,600	1,600	1,600	1,600	500	600

Figura 30: Strategia di sostituzione degli attuali reattori nucleari con reattori di III e IV generazione: EPR ed ELSY - Scenario HIGH

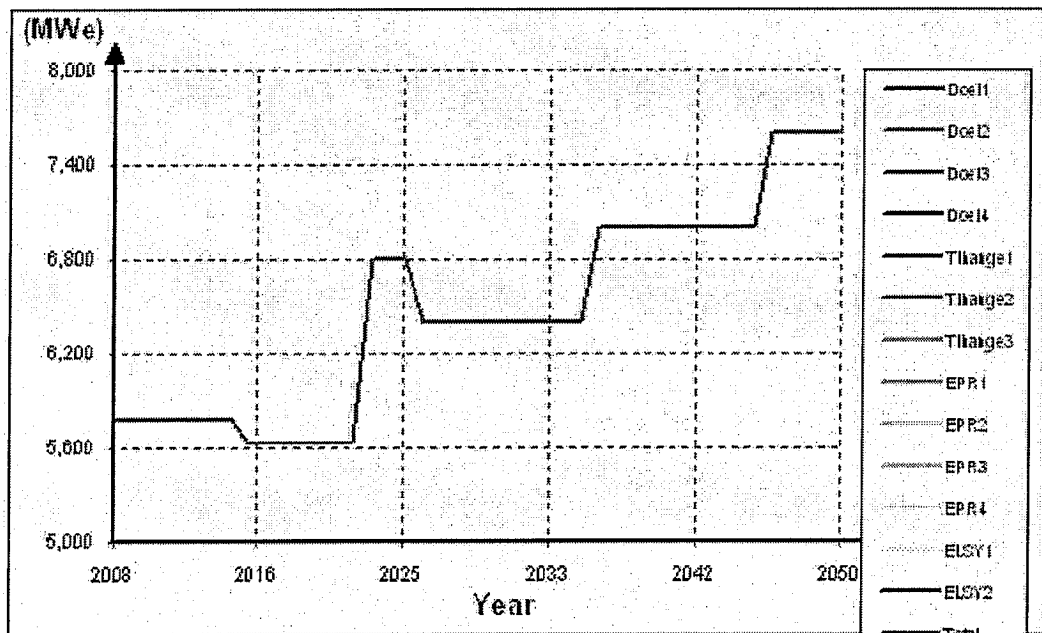


Figura 31: Andamento della Energia prodotta con il nucleare - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

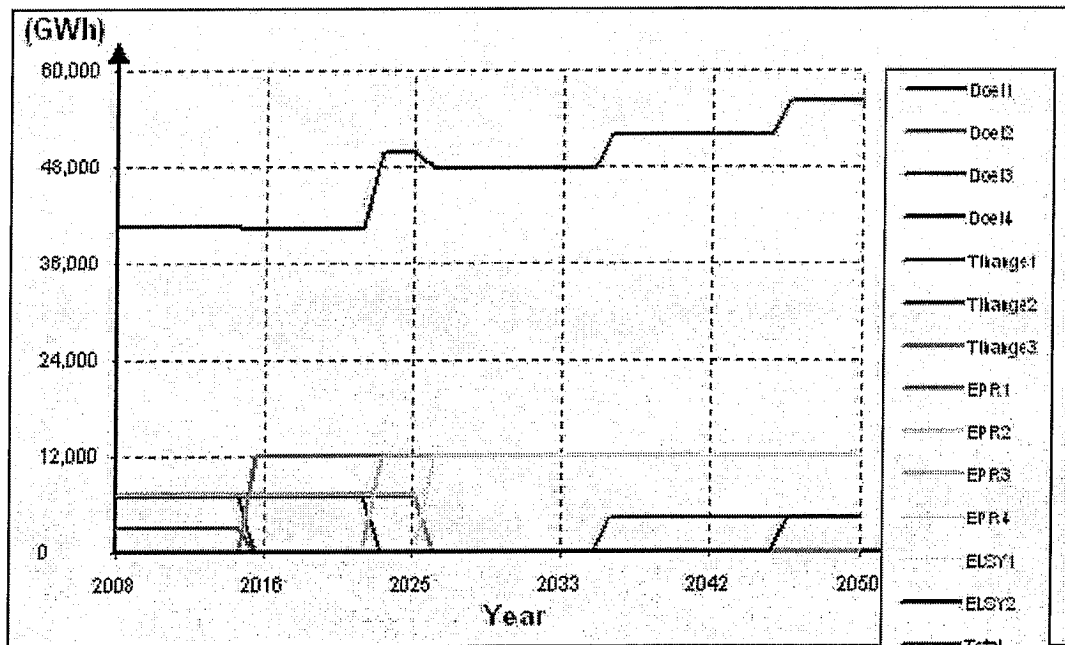


Figura 32: Andamento della Energia prodotta con il nucleare - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

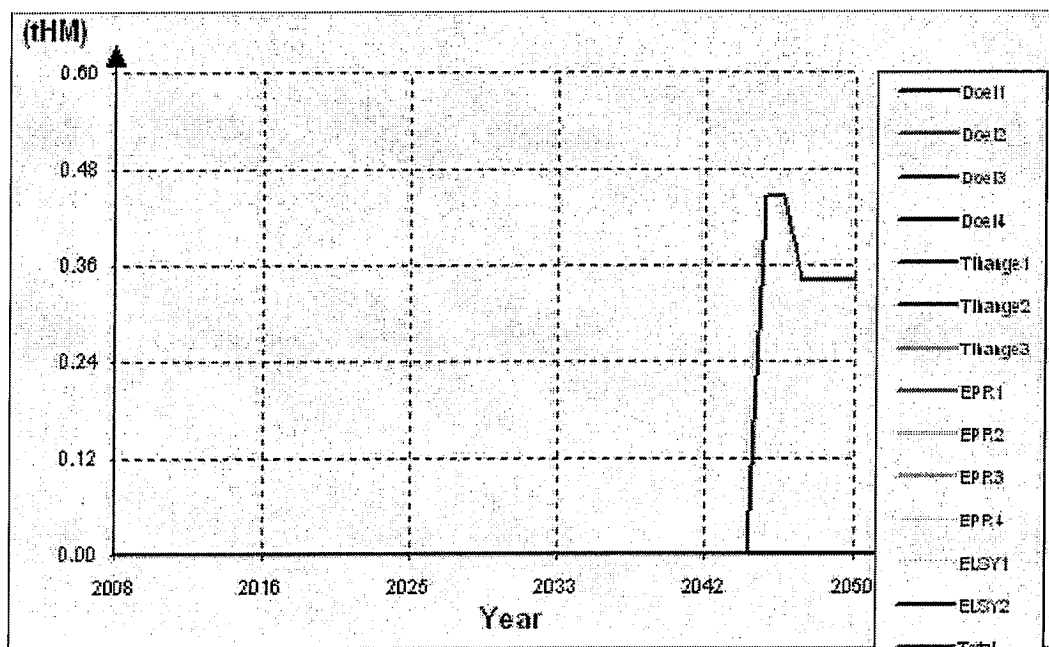


Figura 33: Quantità di Pu riprocessato - Scenario HIGH

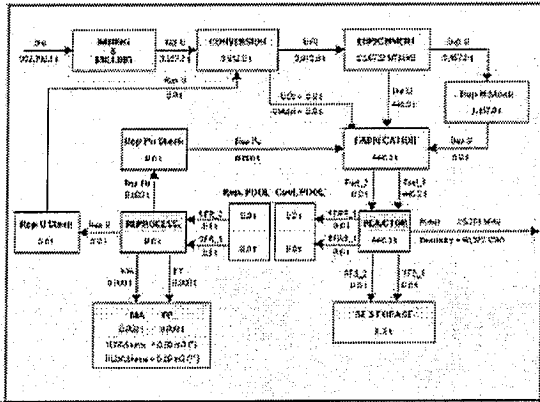


Figura 34: Schema a blocchi fuel cycle scenario 2008 - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

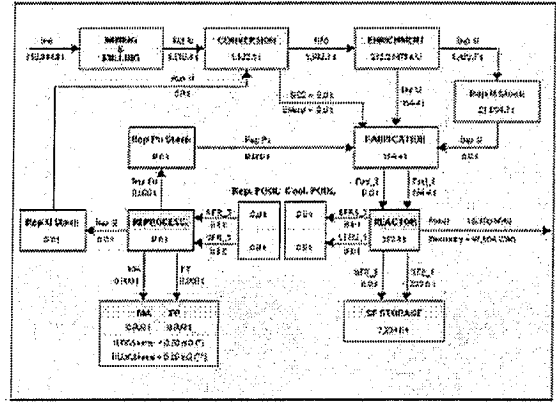


Figura 35: Schema a blocchi fuel cycle scenario 2026 - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

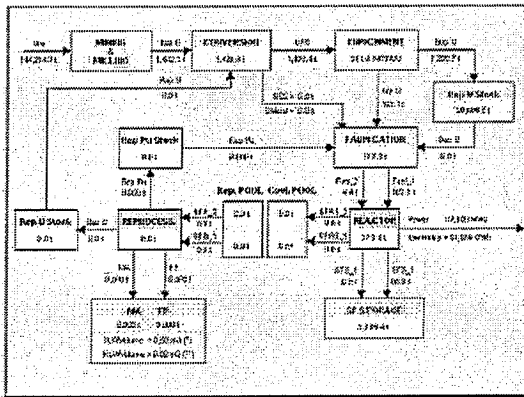


Figura 36: Schema a blocchi fuel cycle scenario 2036 - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

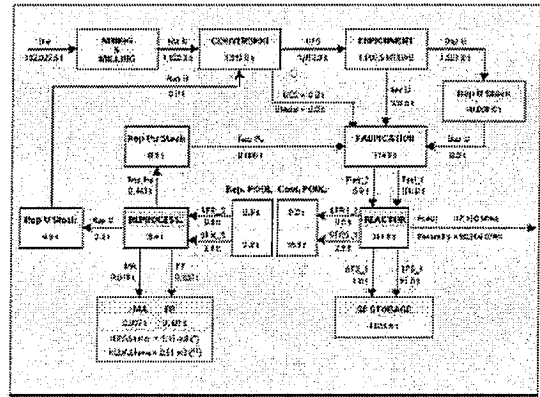


Figura 37: Schema a blocchi fuel cycle scenario 2046 - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

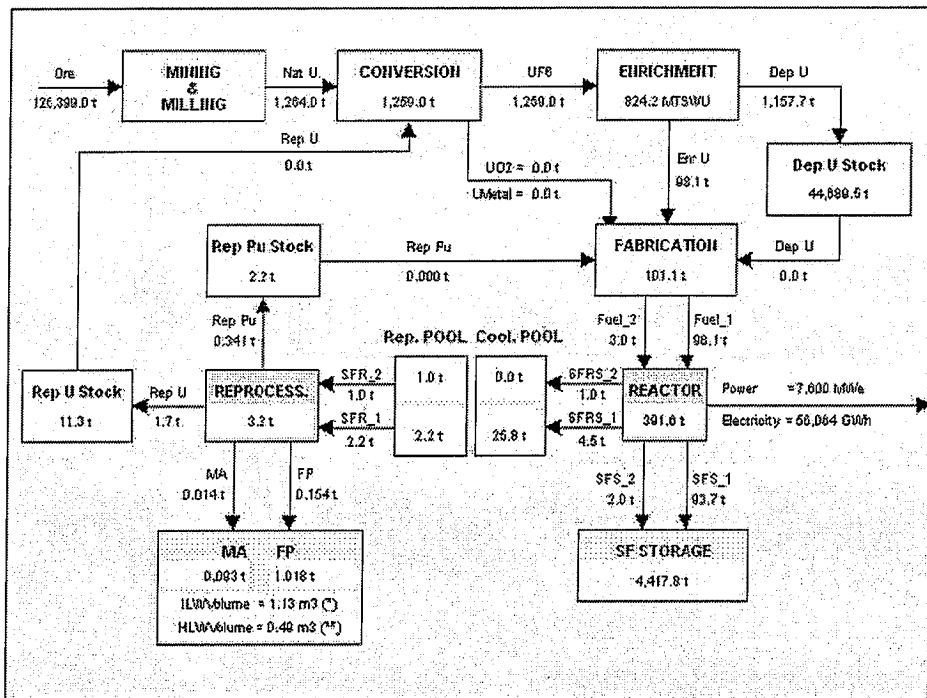


Figura 38: Schema a blocchi fuel cycle scenario 2050 - Scenario HIGH - Belgio [by NFCSS-IAEA]

Anche per questa analisi particolare attenzione va rivolta ad alcuni schemi di ciclo (2008, 2026, 2036, 2046 e 2050). Si può anche avere in uscita dal codice l'inventario di fuel esausto accumulato in deposito (Figura 39).

Brevemente prima di concludere, si può sottolineare che per implementare lo scenario HIGH sono stati introdotti nel codice i parametri relativi al reattore ELSY. I dati usati sono quelli attualmente in sviluppo per il reattore. In Figura 40 è riportata la schermata del codice NFCSS dove si vedono i parametri introdotti per ELSY.

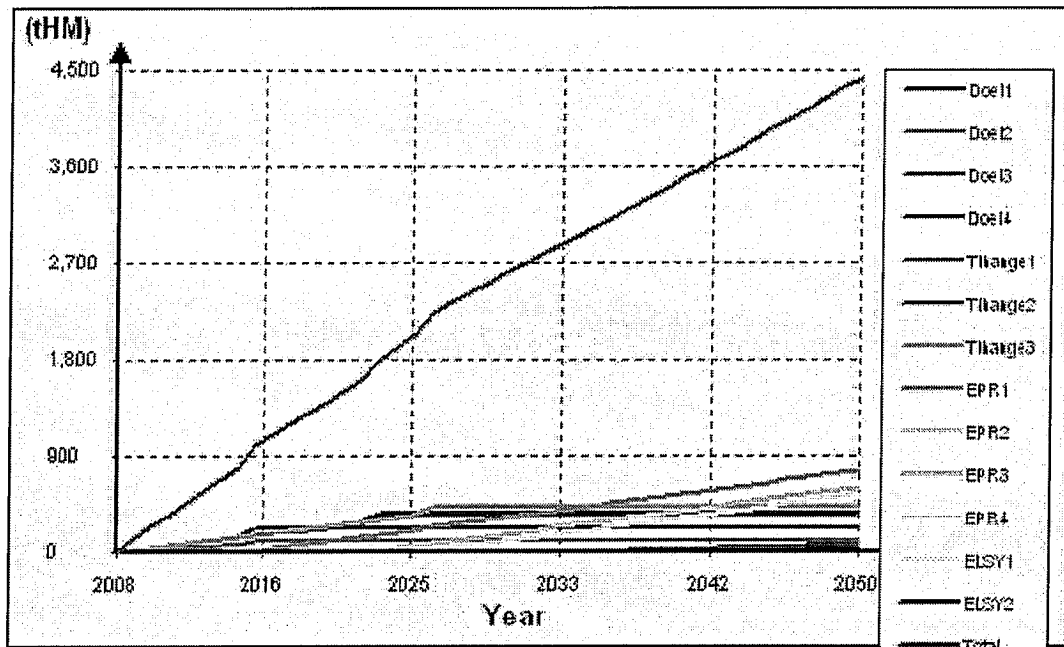
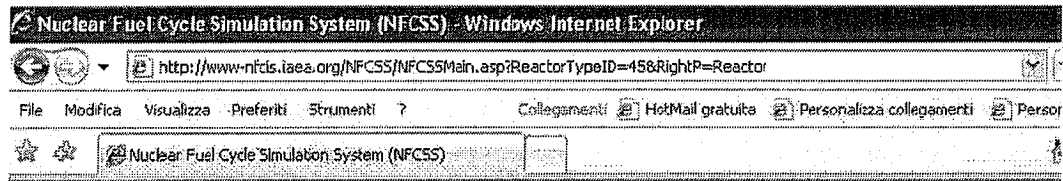


Figura 39: Andamento dello SNF accumulato dal Parco macchine Belga - scenario HIGH [by NFCSS-IAEA]





### NFCSS Reactor Page

Reactor TypeID: 45

Delete This Reactor

Reset Form

Save Reactor Data

Reactor Characteristics	
Reactor Type Group: (*)	LMFR <input type="checkbox"/> <input checked="" type="checkbox"/>
Reactor Type: (*)	ELSY <input type="checkbox"/>
Reactor Type Long :	European Lead cooled system <input type="checkbox"/>
Reactor Type Description :	<input type="text"/>
Information Source :	<input type="text"/>
Net Capacity: (*)	500 (MWe) <input type="checkbox"/>
Efficiency: (*)	40 (%) <input type="checkbox"/>
Load Factor: (*)	80 (%) <input type="checkbox"/>
Tails Assay: (*)	0.3 (%) <input type="checkbox"/>
FuelType2 Share: (*)	23 (%) <input type="checkbox"/>
Residence Time: (*)	1 (yr) <input type="checkbox"/>
Fuel Data	
Fuel Type 1	
Enrichment1: (*)	15 (%) <input type="checkbox"/>
Burnup1: (*)	57 (GWd/t) <input type="checkbox"/>
Reprocessing Ratio1: (*)	45 (%) <input type="checkbox"/>
Fuel Type 2	
Total Pu Content: (*)	15 (%) <input type="checkbox"/>
Burnup2: (*)	72 (GWd/t) <input type="checkbox"/>
Reprocessing Ratio2: (*)	34 (%) <input type="checkbox"/>

Figura 40: Schermata del codice NFCSS per introdurre i dati relativi al reattore ELSY

## 4 Conclusioni

Con questo lavoro si è voluto, sia pure a livello preliminare, iniziare a porre l'attenzione sulle ragioni per cui è necessario svolgere analisi di scenario in ambito nucleare e su quale possa essere una metodologia razionale da adottare. Il concetto di sviluppo sostenibile più volte richiamato è elemento trainante in questo tipo di analisi, con aspetti tecnici quali le composizioni isotopiche raggiunte a seguito dell'irraggiamento in un reattore attualmente in esercizio o quelle attese dai reattori di nuova generazione, e aspetti sociali, quali i concetti di accettabilità o gli strumenti adottati da organismi internazionali, che sono strettamente collegati. Diversamente non si poteva evidenziare come sono articolate le azioni da compiere per arrivare alla sostenibilità [14].

Dopo aver tratteggiato la base dell'analisi è possibile andare a sviluppare i diversi scenari e a confrontarli fra loro.

In questo lavoro è stato presentato solo un modello semplificato di scenario per il Belgio che dovrà essere ampliato, commentato e confrontato con gli altri scenari che verranno implementati nello sviluppo futuro previsto della presente attività di ricerca. Quanto trattato, rappresenta un punto di partenza e, dunque, un esempio per mostrare come si può sviluppare un'analisi di scenario.

Attività future vedranno l'ulteriore sviluppo di questi concetti e un loro ampliamento anche alle altre aree indicate, dove il caso Italia sarà il prossimo caso da analizzare.

## Riferimenti bibliografici

1. Commissione delle Comunità Europee. Libro verde una strategia europea per un'energia sostenibile, competitiva e sicura. Technical Report SEC(2006) 317, Comunità Europea, March 2006.
2. Consiglio dell'Unione Europea. Consiglio Europeo di Bruxelles (9 marzo 2007) conclusioni della presidenza. Technical Report 7224/07, UNIONE EUROPEA, 2007.
3. Parlamento Europeo. Report on conventional energy sources and energy technology. Technical Report A60348/2007, Unione Europea, 2007.
4. Intergovernmental Panel on Climate Change. Emissions Scenarios. Technical report, IPCC, 2000.
5. International Energy Agency. Energy technology perspectives. Technical report, OECD, 2008.
6. IAEA. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2030. Technical report, IAEA, 2008.
7. NERACGIFIV. A technology roadmap for generation iv nuclear energy systems. Technical Report

- GIF00200, U.S. DOE, 2002.
8. L.Cinotti et al. LFR Leadcooled Fast Reactor. In FISA Conference, 2006.
  9. EUROpean Research Programme for the TRANSmutation of High Level Nuclear Waste in an Accelerator Driven System (EUROTRANS), 2002.
  10. T.Botella et al. European Citizens Opinions towards Radioactive Waste: an updated review. EU, April 2006.
  11. NEA. Uranium 2007: Resources, production and demand. Technical report, OECD, 2007.
  12. NEA. Nuclear energy data. Technical report, OECD, 2008.
  13. Marielle BASSAN. Eurostat data in focus. Technical report, Commissione Europea, 2008.
  14. G.Brundtland et al. Our common future: The world commission on environmental and development. Technical report, Oxford, 1987.
  15. Nazioni Unite. Agenda 21: Programme of action for sustainable development. Technical report, 1992.
  16. IAEAUNDESAIBAEurostatEEA. Energy indicators for sustainable development: Guidelines and methodologies. Technical report, IAEA, 2005.
  17. NEA. Risks and Benefits of Nuclear Energy. Technical Report No. 6242, OECD, 2007.
  18. IEA and NEA. Projected costs of generating electricity: Updated 2005. Technical report, OECD, 2005.
  19. <http://www.aspoitalia.net/>.
  20. <http://www.needsproject.org/>.
  21. B. Calgaro and B. Vezzoni. CONTRIBUTION TO LONG TERM MINOR ACTINIDES MANAGEMENT THROUGH TRANSMUTATION IN ACCELERATOR DRIVEN SYSTEMS (ADS). In Proceedings of the International Youth Conference on Energetics (IYCE2007), Budapest, 2007.
  22. B.Calgaro et al. B.Vezzoni. Spent nuclear fuel radiotoxicity evaluation in the context of minor actinides management with ads systems. In ICONE16, 2008.
  23. ICRP. Publication 72: Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, 1996.
  24. ICRP. Publication 103: Recommendation of the International Commission on Radiological Protection. Pergamon Press, Oxford, 2008.
  25. Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS) User Manual, 2008.
  26. <http://www.insc.anl.gov/>.