

**Titolo**
**Analisi di scenari energetici: studio preliminare dello scenario italiano**

G. Forasassi, B. Vezzi (Dipartimento di Ingegneria Meccanica, Nucleare e della Produzione \_ Univ. Di Pisa)

App.B: F.Bianchi, R. Calabrese, G. Glinatsis, A. Lantieri, S. Monti, F. Vettraino (ENEA)

**Ente emittente** CIRTEN

# PAGINA DI GUARDIA

**Descrittori**
**Tipologia del documento:** RAPPORTO TECNICO

**Collocazione contrattuale:** Accordo di programma ENEA-MSE: tema di ricerca "Nuovo nucleare da fissione"

**Argomenti trattati:** Reattori Nucleari Evolutivi, Reattori e Sistemi Innovativi

**Sommario**

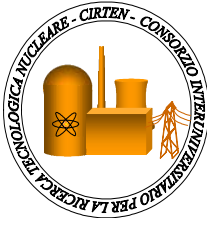
L'analisi dello scenario energetico e della sua evoluzione futura, così come l'analisi di tutto il ciclo del combustibile associato ai reattori nucleari, e' particolarmente interessante per un Paese come l'Italia che si appresta ad una rinascita nucleare. Infatti, un'analisi dettagliata delle infrastrutture necessarie a sostenere il ciclo del combustibile nucleare (sia nel caso esse vengano installate nel Paese stesso o sia si faccia riferimento ad infrastrutture di Paesi esteri) può essere di aiuto alla individuazione di vantaggi ed di eventuali svantaggi legati all'utilizzo di questa tecnologia.

Con il presente lavoro si vuole fornire un contributo all'analisi dello scenario italiano fornendo alcune considerazioni preliminari in vista della re-introduzione degli impianti nucleari sul territorio. Lo scopo del lavoro e', dunque, l'individuazione di possibili punti critici relativi allo sviluppo dello scenario italiano, andando ad evidenziare le differenze rispetto agli scenari ipotizzabili per altri Stati dove la produzione nucleare non ha subito nessun arresto.

L'applicazione che verrà presentata e' un'applicazione preliminare e di carattere accademico, il punto di partenza per ulteriori analisi attualmente in corso presso l'Università di Pisa.

**Copia n.**
**In carico a:**

|      |             |           |       |   |       |   |
|------|-------------|-----------|-------|---|-------|---|
| 2    |             |           | NOME  |   |       |   |
|      |             |           | FIRMA |   |       |   |
| 1    |             |           | NOME  |   |       |   |
|      |             |           | FIRMA |   |       |   |
| 0    | EMISSIONE   | 15.9.2010 | NOME  | Renato Tinti  | N.A.  | Stefano Monti   |
|      |             |           | FIRMA |  |       |  |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA      |       | CONVALIDA   | VISTO | APPROVAZIONE  |



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

**UNIVERSITA' DI PISA**  
**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA NUCLEARE E DELLA**  
**PRODUZIONE**

## **Analisi di Scenari Energetici: studio preliminare dello scenario italiano**

**CIRTEN-UNUPI RL 1052-2010**

### **AUTORI**

**G. Forasassi**

**B. Vezzoni**

**(Appendice B: F. Bianchi, R. Calabrese, G. Glinatsis, A. Lantieri, S. Monti, F. Vettrai)**

**PISA, LUGLIO 2010**

Lavoro svolto in esecuzione della linea progettuale LP1 punto E3 - AdP ENEA MSE del 21/06/07  
Tema 5.2.5.8 – “Nuovo Nucleare da Fissione”.

**PISA, LUGLIO 2010**

---

# Indice

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione</b>   | <b>6</b>  |
| <b>2</b> | <b>Metodologia alla base delle analisi di scenario</b>                                    | <b>8</b>  |
| <b>3</b> | <b>Domanda energetica futura</b>  | <b>12</b> |
| 3.1      | Proiezioni energetiche al 2100 . . . . .  | 13        |
| 3.1.1    | Proiezioni dell'Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC .                        | 14        |
| 3.1.2    | Proiezioni dell'International Institute for Applied Systems Analysis<br>- IIASA . . . . . | 22        |
| 3.2      | Esempio di scenario mondiale - ENEA . . . . .   | 26        |
| <b>4</b> | <b>Caso studio: Scenario Italiano</b>   | <b>27</b> |
| 4.1      | Scenario Storico: 1963-1990 . . . . .   | 29        |
| 4.2      | Scenari futuri Italia: 2008-2050 . . . . .  | 35        |
| 4.2.1    | Scenario ONE . . . . .  | 38        |
| 4.2.2    | Scenario TWO . . . . .  | 40        |
| 4.2.3    | Scenario THREE . . . . .  | 42        |
| <b>5</b> | <b>Conclusioni</b>  | <b>45</b> |
| <b>A</b> | <b>Appendice: Dati storici Italia</b>   | <b>48</b> |
| <b>B</b> | <b>Appendice: Studio ENEA</b>   | <b>53</b> |

---

## Elenco delle figure

|    |   |    |
|----|---|----|
| 1  | Schema a blocchi semplificato della metodologia adottata nelle analisi di scenario . . . . .                            | 9  |
| 2  | Suddivisione del mondo in 11 regioni (IIASA), raggruppate poi nelle 4 macro-regioni considerate dall'IPCC [1] . . . . . | 14 |
| 3  | Illustrazione schematica degli scenari SRES: le 4 famiglie vs. driving forces [1] . . . . .                             | 17 |
| 4  | Suddivisione degli scenari all'interno delle famiglie [1] . . . . .   | 19 |
| 5  | OECD90 vs famiglie (dati relativi ai marker scenarios) . . . . .  | 19 |
| 6  | Variazione della domanda energetica all'interno di un'unica famiglia (B2) vs il modello adottato . . . . .              | 20 |
| 7  | OECD90 vs famiglie (dati relativi al modello MESSAGE) . . . . .   | 20 |
| 8  | Schema semplificato del modello di calcolo adottato dall'IIASA, modello centrale: MESSAGE . . . . .                     | 24 |
| 9  | Confronto fra gli scenari proposti dall'IIASA [OECD90] . . . . .  | 24 |
| 10 | Confronto fra lo scenario B-IIASA e lo scenario B2-IPCC [modello di riferimento: MESSAGE] . . . . .                     | 25 |
| 11 | Confronto fra gli scenari proposti dalla IIASA per l'Europa occidentale [WEU] . . . . .                                 | 26 |
| 12 | Scenario HIGH (linea rossa) e LOW (linea blu) per la Spagna, periodo 2008-2050 . . . . .                                | 28 |
| 13 | Scenario HIGH Spagna: possibile sostituzione del parco macchine per coprire la domanda HIGH ipotizzata . . . . .        | 29 |
| 14 | Mix energetico in Italia periodo 1963 - 1989 [2] . . . . .  | 30 |
| 15 | Schermata NFCSS: introduzione dati reattore di Latina (GCR) . . . . .   | 31 |
| 16 | Schermata NFCSS: introduzione dati reattore di Caorso (BWR) . . . . .   | 31 |
| 17 | Variazione dei fattori di carico per i reattori italiani (1963-1989). Dati PRIS-IAEA [3] . . . . .                      | 32 |
| 18 | Produzione elettrica italiana da nucleare: periodo 1963-1990 . . . . .  | 33 |
| 19 | Capacità nucleare installata in Italia nel periodo 1963-1990 . . . . .  | 33 |
| 20 | HLW in stock . . . . .  | 34 |
| 21 | HLW volume annuale prodotto . . . . .   | 34 |
| 22 | ILW in stock . . . . .  | 34 |
| 23 | ILW volume annuale prodotto . . . . .   | 34 |

---

|    |   |    |
|----|---|----|
| 24 | Combustibile esausto presente al 2008 in Italia . . . . .                     | 35 |
| 25 | SF inventory in piscina prima del reprocessamento . . . . .                   | 36 |
| 26 | Scenari proposti per il caso italiano . . . . .                               | 37 |
| 27 | Frazioni di nucleare sul totale della produzione elettrica . . . . .          | 38 |
| 28 | Capacità installata scenario ONE, fattore di carico costante . . . . .        | 39 |
| 29 | Elettricità prodotta annualmente scenario ONE . . . . .                       | 39 |
| 30 | U naturale salvato dall'uso del MOX nel periodo 2030-2038, scenario ONE .     | 39 |
| 31 | U naturale richiesto per lo scenario ONE, valori annuali . . . . .            | 39 |
| 32 | Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario ONE . . . . .    | 39 |
| 33 | Elettricità prodotta annualmente, scenario TWO . . . . .                      | 40 |
| 34 | U naturale richiesto per lo scenario TWO, valori annuali . . . . .            | 41 |
| 35 | U naturale salvato dall'uso del MOX nel periodo 2030-2038, scenario TWO .     | 41 |
| 36 | Spent Fuel annualmente disponibile al riprocessamento, scenario TWO . . .     | 41 |
| 37 | Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario TWO . . . . .    | 41 |
| 38 | Bilancio di massa fra le facility del ciclo al 2050, scenario TWO . . . . .   | 42 |
| 39 | Elettricità prodotta annualmente, scenario THREE . . . . .                    | 43 |
| 40 | U naturale richiesto per lo scenario THREE, valori annuali . . . . .          | 43 |
| 41 | U naturale salvato dall'uso del MOX, scenario THREE . . . . .                 | 43 |
| 42 | Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario THREE . . . . .  | 44 |
| 43 | Bilancio di massa fra le facility del ciclo al 2050, scenario THREE . . . . . | 44 |

---

## Elenco delle tabelle

|   |  |    |
|---|--|----|
| 1 | Ratei storici di crescita media annui per l'Europa Occidentali - dati IAEA [4]               | 12 |
| 2 | Ratei di crescita media annui per l'Europa Occidentali: proiezioni 2007-2030 - dati IAEA [4] | 12 |
| 3 | Dati storici Italia [2]  | 29 |
| 4 | Tre possibili <i>electricity envelops</i> per l'Italia                                       | 36 |
| 5 | Dati storici Italia: CAORSO [3]  | 48 |
| 6 | Dati storici Italia: TRINO [3]   | 49 |
| 7 | Dati storici Italia: GARIGLIANO [3]  | 50 |
| 8 | Dati storici Italia: LATINA [3]  | 51 |
| 9 | Dati storici Italia: mix energetico [2]  | 52 |

---

# 1 Introduzione

L'analisi dello scenario energetico e della sua evoluzione futura, così come l'analisi di tutto il ciclo del combustibile associato ai reattori nucleari, e' particolarmente interessante per un Paese come l'Italia che si appresta ad una rinascita nucleare.

Infatti, un'analisi dettagliata delle infrastrutture necessarie a sostenere il ciclo del combustibile nucleare (sia nel caso esse vengano installate nel Paese stesso o sia si faccia riferimento ad infrastrutture di Paesi esteri) può essere di aiuto alla individuazione di vantaggi ed di eventuali svantaggi legati all'utilizzo di questa tecnologia.

Con il presente lavoro si vuole fornire un contributo all'analisi dello scenario italiano fornendo alcune considerazioni preliminari in vista della re-introduzione degli impianti nucleari sul territorio. Lo scopo del lavoro e', dunque, l'individuazione di possibili punti critici relativi allo sviluppo dello scenario italiano, andando ad evidenziare le differenze rispetto agli scenari ipotizzabili per altri Stati dove la produzione nucleare non ha subito nessun arresto. L'applicazione che verrà presentata e' un'applicazione preliminare e di carattere accademico, il punto di partenza per ulteriori analisi attualmente in corso presso l'Università di Pisa.

Il presente lavoro va ad aggiungersi al rapporto CIRTEN - CERSE 2008 (RL 1051- 2008) [5] in cui e' stata descritta nel dettaglio la *rational* adottata per le analisi di scenario presso l'Università di Pisa. Richiamandola brevemente (vedasi Figura 1 Par. 2) il punto di partenza e' il concetto di sviluppo sostenibile applicato alle fonti energetiche (ed in particolare al nucleare), dove per sviluppo sostenibile si intende l'accordo di un insieme di fattori eterogenei quali l'economia, l'ambiente e gli aspetti sociali. Tale approccio (lo studio dell'energia nucleare in ambito di sviluppo sostenibile) e' in accordo con le posizioni assunte dalla Comunità Europea in materia di sviluppo energetico: vedasi ad esempio lo *Strategic Energy Technology Plan (SET)* del 2007 [6] o la piattaforma tecnica *Sustainable Nuclear Energy Technology Platform (SNE-TP)* [7] , lanciata anch'essa nel 2007.

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 a sostegno alle scelte energetiche che i singoli Stati saranno costretti ad intraprendere a breve e medio termine. Lo scopo di tali analisi e' fare emergere punti critici degli scenari ipotizzati e permettere di supportare, da un punto di vista tecnico, le scelte fatte a livello governativo (politico) ed industriale, fornendo una valutazione delle possibili alternative.

In particolare, vista la natura della fonte nucleare tutto il ciclo del combustibile deve essere analizzato e non solo la parte reattore. Infatti, il ciclo del combustibile nucleare prevede la messa in esercizio di svariati impianti industriali (impianti che vanno dall'arricchimento

---

al riprocessamento del materiale fino al deposito geologico profondo) che hanno un impatto considerevole sia sull'economia di un Paese (o di un'area geografica più vasta come l'Europa) sia sull'impatto ambientale relativo alla fonte energetica stessa.

L'analisi del ciclo del combustibile, sviluppata con un codice dedicato (es. NFCSS sviluppato dall'IAEA [8] o COSI6 dal CEA [9] ) e' un processo che sta a valle della scelta e dello studio dello scenario energetico. Per definire lo scenario energetico sarà necessario fissare a priori il periodo di interesse (2010-2050, o 2010-2100), i ratei di crescita energetica attesi (valori che si basano sia sulla crescita della popolazione, quindi dei bisogni complessivi, sia sullo stato di avanzamento tecnologico del Paese di riferimento), la frazione da coprire con il nucleare (sia del totale di energia primaria che per il solo settore elettrico), e l'attuale condizione del parco nucleare installato (numero e tipologia degli impianti presenti, tempo rimasto prima dello shut-down, possibilità' di estensione della vita, etc.). Tutti questi parametri permettono di definire le condizioni al contorno per lo scenario. Più questa analisi preliminare per un paese e' dettagliata più' le ipotesi introdotte nello scenario rendono i risultati ragionevoli. La scelta dunque delle ipotesi e' fondamentale, e il criterio alla base di questa scelta e' la ragionevolezza, criterio a volte di non facile gestione perché' difficilmente quantificabile.

Si e' scelto di definire la domanda energetica futura sulla base dei dati forniti da alcuni Enti Internazionali di riferimento come l'*Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) [1], l'*International Institute for Applied Systems Analysis* (IIASA) [10] e l'*International Atomic Energy Agency* (IAEA) [4]. Questi enti, infatti, adottano sistemi complessi per la definizione degli scenari energetici (soprattutto quando si tratta di proiezioni al 2100) che tengono conto sia di valutazioni economiche che di valutazioni circa la crescita attesa della popolazione (fissando un valore per il consumo energetico pro-capite) e sia del livello di sviluppo tecnologico di una certa area omogenea considerata. Ad ogni modo, tutte queste valutazioni sono affette da errore sistematico dovuto al fatto che i modelli non possono trattare con lo stesso grado di accuratezza tutte le fonti di produzione elettrica o energetica e quindi a seconda dell'analisi da fare (nucleare o fonti rinnovabili o carbone, etc.) una valutazione dei dati di partenza e' auspicabile e fondamentale. Per chiarire meglio questo aspetto, nel presente documento é presentato un confronto dei dati disponibili in letteratura e relativi alle proiezioni energetiche dei Paesi OECD (Par. 3.1).

Come inizialmente indicato, la scelta fatta e' stata quella di focalizzare l'attenzione sullo scenario italiano andando ad analizzare l'introduzione di reattori di III generazione (es. gli *European Pressurized Reactor* - EPR) entro la prossima decade, per poi ampliare lo studio all'eventuale transizione ai reattori veloci. Nel presente report sono state descritte le ipotesi

---

da cui si e' partiti ed alcuni risultati preliminari ottenuti. Il lavoro e' tutt'oggi in corso come lavoro di Tesi di Dottorato presso l'Università di Pisa in collaborazione con il *Karlsruhe Institute of Technology* (KIT), Germania. Ad ogni modo, questo studio preliminare e' utile per fissare la metodologia di lavoro e per iniziare ad evidenziare alcuni parametri di riferimento quali, ad esempio, le risorse di uranio coinvolte nello scenario, le risorse di Pu prodotte (utili in seguito per lo sviluppo dei reattori veloci) e le quantità di rifiuti prodotti (divise a seconda del grado di pericolosità).

Il codice di riferimento adottato nel presente studio e' il codice NFCSS (*Nuclear Fuel Cycle Simulation System*) sviluppato dalla IAEA [8]. Questo codice si presta bene per l'analisi dell'introduzione di una singola tipologia di reattore (es. Gen. III o Gen. IV considerati singolarmente) ma non e' sufficientemente flessibile a simulare scenari *double-strata* o transizioni da termici a veloci più articolate (scenari per i quali codici più complessi, es. COSI6 [9] dovranno essere adottati). Ad ogni modo, come strumento di approccio preliminare può essere ritenuto sufficientemente accurato.

A tal proposito, e' stato riprodotto con il codice NFCSS lo scenario italiano fra il 1963-1990, tenendo conto della storia dettagliata dei 4 reattori installati sul territorio. I risultati ottenuti sono ragionevoli e verranno descritti più in dettaglio nei paragrafi seguenti (Par. 4.1)

Scenari di carattere più ampio, come il lavoro presentato da ENEA al Congresso Nuclear Energy for New Europe (NENE) 2009 [11] e riportato interamente in Appendice B permette di prendere in considerazione un aspetto particolarmente significativo per il futuro sviluppo dell'energia nucleare: l'ottimizzazione delle risorse coinvolte. Lo studio presentato da ENEA, sviluppato all'interno del progetto INPRO [12] dell'IAEA, si focalizza nell'analisi della massima capacità di sviluppo dei reattori veloci sia su scala europea che mondiale.

## **2 Metodologia alla base delle analisi di scenario**

La metodologia adottata per il confronto dei possibili scenari di sviluppo del nucleare e' stata già precedentemente descritta nel rapporto CIRTEN - CERSE 2008 (RL 1051- 2008) [5]. Ad ogni modo, un breve richiamo può essere utile per l'introduzione allo studio del caso italiano, parte centrale del presente report.

Con riferimento alla Figura 1, dove e' rappresentato in modo semplificato il flusso logico adottato nelle analisi, il punto di partenza e' lo studio della condizione locale di un determinato Paese (o area di interesse, es. Europa).

Infatti, si parte dalla conoscenza del parco-reattori in un determinato Paese: nota dunque la vita media dei reattori, la tipologia dei reattori installati e la politica nucleare adottata,

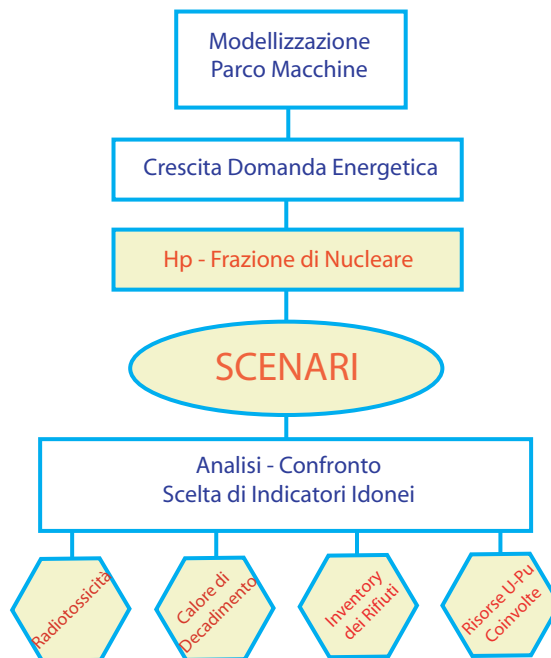


Figura 1: Schema a blocchi semplificato della metodologia adottata nelle analisi di scenario

e' possibile stabilire le condizioni iniziali dello scenario. Questo set di dati permette anche di analizzare l'andamento storico seguito dalla produzione elettrica nucleare; aspetto non trascurabile se si vuole applicare allo scenario proposto un certo grado di continuità con il passato.

Quindi, una volta note le condizioni locali, rimane da determinare la domanda energetica futura e la quota parte da coprire con la produzione nucleare.

E' ben noto che, ad oggi, il nucleare contribuisce maggiormente alla produzione elettrica e solo in piccola parte ad altri usi industriali. Condizione che comunque potrebbe modificarsi visto il crescente interesse per l'uso del nucleare per fabbisogni industriali (processi ad alta temperatura) o per fabbisogni relativi al settore dei trasporti (es. processo I-S per la produzione di idrogeno).

Tuttavia, l'analisi delle proiezioni future di energia e' stata ristretta al solo settore elettrico andando ad individuare la percentuale coperta dal nucleare e l'andamento che essa ha avuto negli anni passati, in modo da mantenere (o lievemente incrementare) tale trend sul breve periodo.

Per definire quindi tale domanda energetica futura, si fa riferimento ad un numero ri-

---

stretto di Enti Internazionali accreditati (IPCC, IIASA, IAEA, IEA) fra i quali, l'IAEA (ed eventualmente la NEA/OECD come organismo di coordinamento) fornisce dati interessanti per il nucleare, in quanto organizzazione fra quelle citate più focalizzata allo sviluppo di questa tecnologia. La scelta di dati forniti da una Organizzazione o da un'altra dipende dalla scala temporale che si vuole adottare per l'analisi.

In particolare, per lo scenario italiano preliminare presentato di seguito (Par. 4), i dati adottati sono relativi alla pubblicazione *Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the period up to 2030* dell'IAEA [4], perché essa fornisce direttamente i ratei annui di crescita sia per i bisogni elettrici che per la produzione nucleare. Tale pubblicazione risulta utile anche perché fornisce due trend di sviluppo, rispettivamente un andamento LOW ed un andamento HIGH, che permettono di definire i margini per l'analisi, margini entro i quali gli altri scenari possono essere inseriti.

I dati forniti dall'IAEA sono relativi al periodo 2005-2030 ma estrapolabili fino al 2050 (dati in accordo con le proiezioni fornite dalla NEA [13]). Si è scelto questo periodo di tempo per lo studio preliminare perché è stata considerata come predominante la necessità di mantenere una certa continuità con gli andamenti storici rispetto all'interesse dello studio della crescita energetica a fine secolo. Ovviamente questo comporta delle limitazioni per l'analisi stessa. Infatti, lo studio di scenari su una scala temporale breve non permette di analizzare a pieno l'introduzione dei reattori veloci (introduzione intorno al 2040) e gli effetti che questa introduzione comporta su risorse e rifiuti. Limitando il periodo al 2050 non si potranno studiare gli effetti sulle condizioni di equilibrio ma solo sulle condizioni di start-up dei reattori veloci.

A tal proposito, è auspicabile adottare una scala temporale più estesa (per lo meno fino al 2100, ma ancor meglio al 2200). Adottando però una scala temporale fino al 2100, gli unici dati disponibili in letteratura sono quelli reperibili dall'IPCC e dall'IIASA. Entrambi, infatti, forniscono stime della domanda energetica fino al 2100 (per l'estensione al 2200 si può ipotizzare che nel periodo 2100-2200 non ci siano variazioni della domanda e che si sia raggiunta una condizione di equilibrio per i bisogni elettrici). I valori forniti dall'IPCC e dall'IIASA per quanto riguarda lo sviluppo nucleare sono abbastanza discutibili come verrà mostrato nei Par. 3.1.1 e 3.1.2, complicando la scelta dei dati in input alle analisi di *fuel cycle*.

Ad ogni modo, una volta nota la domanda di energia elettrica per il periodo considerato (es. 2008-2050) e la frazione di essa da coprire con il nucleare, è possibile proporre alcuni scenari di evoluzione per il parco macchine inizialmente installato.

Per definire gli scenari si è tenuto conto della disponibilità o meno di una certa tecnologia,

---

ad esempio, si è ipotizzato di introdurre i reattori di IV generazione solo dopo una certa data (intorno al 2040), visto l'attuale stato di sviluppo (alcuni ancora in fase di R&D)[14].

Una volta che le ipotesi alla base dello scenario sono state stabilite, sulla base del concetto di sviluppo sostenibile dell'energia nucleare si sono decisi a priori gli 'strumenti' per confrontare le varie alternative. Sono stati dunque selezionati alcuni indicatori significativi per il settore elettro-nucleare che mettano in luce i punti di sostenibilità dell'intero ciclo del combustibile. L'analisi dettagliata di questa scelta è stata descritta nel precedente report CIRTEN - CERSE 2008 (RL 1051- 2008) [5] , e nel presente lavoro verranno solo richiamati brevemente gli indicatori scelti.

In particolare, per quanto riguarda la sostenibilità, con riferimento a [15, 16, 17] gli indicatori significativi sono:

- Risorse di Uranio coinvolte (importanti quando si studia lo scenario mondiale),
- Radiotossicità del combustibile esausto (importante per il deposito e l'accettabilità sociale del nucleare),
- Calore di decadimento del combustibile esausto (importante per il deposito),
- Inventory dei rifiuti prodotti.

Fra questi indicatori, l'ottimizzazione delle risorse coinvolte è un fattore particolarmente importante se la scala di interesse si sposta dallo studio di un singolo Stato, verso l'impatto che esso ha a livello di scenario europeo o mondiale, e può influenzare la fattibilità o meno degli scenari. Infatti, la disponibilità di uranio può impattare sia sugli aspetti tecnici (numero di reattori termici in funzione, introduzione dei veloci, ...) che economici (risorse convenzionali o non convenzionali) relativi allo sviluppo del nucleare [18].

Dall'analisi del ciclo del combustibile è interessante anche far emergere altri punti caratterizzanti, quali ad esempio gli impianti industriali coinvolti e necessari a sostenere il ciclo (impianti di arricchimento e di riprocessamento in primis) e le caratteristiche dei reattori adottati (es. per i LWRs l'arricchimento, il rapporto di conversione, il burnup allo scarico e per i reattori veloci il livello di breeder o le caratteristiche di bruciatori). Parametri tutti di grande interesse anche dal punto di vista di una analisi economica dell'intero ciclo.

Prima di entrare nel dettaglio dello studio dello scenario italiano scelto, verrà aperta una parentesi circa i dati disponibili in letteratura per definire e determinare la domanda energetica futura (Par. 3) a seconda della scala temporale scelta.

---

### 3 Domanda energetica futura

Per stabilire i trend della crescita della domanda energetica si e' fatto riferimento ai dati forniti da alcuni Enti Internazionali accreditati.

Per una scala temporale fra il 2005-2050, i dati di riferimento sono quelli dell'IAEA (dati 2007-2030) [4] estrapolabili fino al 2050. Essendo la scala geografica ristretta ai singoli stati europei (o all'Europa nel suo complesso), i ratei di crescita presi a riferimento sono quelli relativi all'Europa Occidentale. Tali dati sono stati riassunti in Tabella 1, per quanto riguarda i dati storici relativi al periodo 1997-2007, ed in Tabella 2, per quanto riguarda le proiezioni per il periodo 2007-2030 (poi estrapolate al 2050).

| Parametri         | Ratei Annui |
|-------------------|-------------|
| 1997-2007         |             |
| Popolazione       | 0.4%        |
| Energia primaria  | 1.0%        |
| Energia elettrica | 1.8%        |
| Energia nucleare  | -0.1%       |
| Capacità nucleare | -0.4%       |

Tabella 1: Ratei storici di crescita media annui per l'Europa Occidentali - dati IAEA [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 2: Ratei di crescita media annui per l'Europa Occidentali: proiezioni 2007-2030 - dati IAEA [4]

Come già indicato l'IAEA fornisce due andamenti per le proiezioni (LOW and HIGH); entrambi sono stati presi a riferimento e considerati come condizioni al contorno entro cui far muovere l'evoluzione attesa.

Per lo scenario italiano, però, questi dati possono essere solo un'indicazione perché il caso italiano risulta abbastanza singolare rispetto alla situazione degli altri paesi europei (es.

---

Spagna, Belgio, ..). Infatti, attualmente sul territorio italiano nessun impianto nucleare e' in esercizio e sono circa 20 anni che non viene prodotta energia da questa fonte. Questo comporta che il criterio di continuit  con i dati storici non pu  essere applicato. Allo stesso modo, non e' possibile adottare il rateo di crescita media per l'Europa occidentale, perch  partendo da zero potenza installata la crescita annua sar  (potr  essere) superiore al valore medio europeo. Si tratta dunque di un caso limite che necessita di ulteriori considerazioni ed ipotesi aggiuntive, ipotesi che verranno poi descritte nel Par. 4.

Come gi  indicato, la scala temporale pu  essere estesa per tener conto del pieno sviluppo dei reattori veloci e delle relative conseguenze. Per questo motivo, seppur non utilizzati per il caso italiano di seguito descritto, pu  essere utile andare ad analizzare i dati delle proiezioni di domanda energetica (primaria ed elettrica) fatte al 2100 (2200). Verranno trattati separatamente sia i dati proposti dall'IPCC (Par. 3.1.1) che quelli proposti dall'IIASA (Par. 3.1.2).

### **3.1 Proiezioni energetiche al 2100**

Come pi  volte ricordato nel corso del presente documento la definizione dei trend di crescita della domanda energetica e' un processo non semplice perch  fattori eterogenei, quali fattori economici (e politici circa la strategia di sviluppo adottata dai singoli stati), ambientali e sociali, devono essere considerati contemporaneamente. Per questo motivo decidere autonomamente la domanda energetica da adottare negli scenari e' un processo arbitrario e rimane pi  utile fare una analisi critica dei dati presenti in letteratura.

Per una scala temporale pi  estesa (proiezioni a lungo termine) gli enti di riferimento risultano essere l'IPCC e l'IIASA. Essi trattano le proiezioni di crescita energetica (primaria e per settore) su scala globale ma, attraverso una suddivisione del mondo in regioni, permettono di avere uno spaccato pi  dettagliato e pi  rispettoso delle diversit  esistenti fra le regioni del mondo. In particolare, l'IPCC adotta 4 macro-regioni accomunate da condizioni di partenza simili o assimilabili, mentre l'IIASA raffina la suddivisione a 11 regioni (eventualmente collassabili in 3 gruppi).

I due approcci sono completamente paragonabili perch  l'IPCC, pur fornendo i dati per le 4 macro-regioni, considera la stessa suddivisione dell'IIASA, come evidenziato in Figura 2. Le 11 regioni trattate dall'IIASA sono le seguenti: North America (NAM), Western Europe (WEU), Pacific OECD (PAO), Central and Eastern Europe (EEU), Newly independent states of the former Soviet Union (FSU), Centrally planned Asia and China (CPA), South Asia (SAS), Other Pacific Asia (PAS), Latin America and the Caribbean (LAM), Middle

East and North Africa (MEA) and Sub-Saharan Africa. Queste stesse, come evidente da Figura 2, sono poi raggruppate dall'IPCC nelle seguenti 4 macro-regioni: Paesi dell'OECD (OECD90), Paesi che stanno compiendo una riforma economica (REF), Regioni Asiatiche (ASIA) e Africa e Sud-America (ALM).

Di seguito saranno descritti nel dettaglio i due approcci.



Figura 2: Suddivisione del mondo in 11 regioni (IIASA), raggruppate poi nelle 4 macro-regioni considerate dall'IPCC [1]

### 3.1.1 Proiezioni dell'Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC

L'Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) e' uno degli Enti Internazionali accreditati per la definizione della domanda energetica futura. Lo scopo principale e' quello di proporre scenari orientati all'analisi dell'impatto sulle emissioni di gas termo-alteranti (possibile con-causa dei cambiamenti climatici riscontrati su scala globale) da attività industriali quali la produzione elettrica.

Nel 2000, infatti, l'IPCC ha fornito alla comunità scientifica una serie di 40 scenari (di sviluppo energetico e di emissioni ambientali) raccolti sotto il nome di *Emission Scenarios* e riassunti nella pubblicazione *Special Report of Emission Scenarios* (il report SRES) [1].

Lo scopo del lavoro, raccolto poi nel report SRES, e' stato quello di investigare, sulla base di un numero limitato di *driving forces*, il panorama dello sviluppo globale futuro per quanto riguarda il settore economico, ambientale e sociale.

---

Per portare avanti questa analisi, il gruppo di lavoro dell'IPCC ha adottato 6 differenti modelli. Il fatto di adottare più di un modello e' servito a poter sviscerare i diversi approcci disponibili per quanto riguarda la modellizzazione delle emissioni e delle differenti valutazioni integrate (*integrated assessment (IA)*) disponibili in letteratura. I 6 modelli adottati, e riassunti brevemente in seguito, sono stati sviluppati da altrettanti enti di ricerca internazionali e tengono conto al loro interno di necessità differenti fra loro (alcuni, infatti, sono più orientati verso l'economia, altri verso la salvaguardia ambientale, altri verso lo sviluppo tecnologico di un paese, ...).

I modelli che sono stati adottati da [1] sono i seguenti:

- **AIM** - *Asian-Pacific Integrated Model* sviluppato dal *National Institute of Environmental Studies* in Giappone. Si tratta di un modello su larga scala per le analisi di scenari di emissione di gas serra (GHG) e di impatto delle stesse sul riscaldamento globale (bottom-up model).
- **ASF** - *Atmospheric Stabilization Framework Model* sviluppato da *ICF Consulting* in USA. Include al suo interno modelli relativi al settore energia, agricoltura, deforestazione, emissioni GHG e modelli atmosferici. Si focalizza sugli usi finali di 4 settori: residenziale, commerciale, industriale and trasporti.
- **IMAGE** - *Integrated Model to Assess the Greenhouse Effect* sviluppato dal *National Institute for Public Health and Environmental Hygiene (RIVM)* in USA. Si tratta di un modello composto da 3 moduli indipendenti (EIS, TES, AOS) in grado di unire fra loro la valutazione del sistema energetico-industriale (per calcolare le emissioni in funzione delle regioni), la valutazione del sistema ambientale terrestre (per simulare l'uso della terra nel complesso) e i cambiamenti relativi e il sistema atmosferico oceanico.
- **MARIA** - *Multiregional Approach for Resource and Industry Allocation* sviluppato dalla *Science University of Tokyo* in Giappone. Si tratta di un sistema integrato compatto per valutare le inter-relazioni fra economia, energia, risorse, uso della terra e cambiamenti climatici globali.
- **MESSAGE** - *Model for Energy Supply Strategy Alternatives and their General Environmental Impact* sviluppato dal *International Institute of Applied Systems Analysis (IIASA)* di Vienna. Si tratta di un sistema modulare in grado di combinare svariati dati storici circa lo sviluppo economico ed energetico con valutazioni empiriche (tradotte in forma di equazioni) dello sviluppo economico ed energetico passato per determinare

---

cambiamenti strutturali futuri. Le principali driving-forces di questo modello sono la crescita della popolazione mondiale (opportunamente suddivisa in regioni) e la crescita economica pro-capite per ogni regione.

- **MiniCAM** - *Mini Climate Assessment Model* sviluppato dal *Pacific Northwest National Laboratory* (PNNL) in USA. Anch'esso un codice modulare in grado di valutare le emissioni globali di gas serra attraverso il modello ERB (modello parziale di equilibrio dei prezzi) per bilanciare fabbisogno e domanda energetica per le sette maggiori sorgenti primarie di energia: carbone, petrolio, gas, nucleare, idroelettrico, solare e biomassa.

Il breve riassunto dei modelli riportato precedentemente, evidenzia quanto la scelta dei dati da usare come condizione al contorno per gli scenari nucleari non è semplice, soprattutto se si aggiunge che non sempre è possibile analizzare nel dettaglio i modelli utilizzati dall'IPCC (non è possibile risalire, a partire dalle pubblicazioni disponibili, al modo preciso con cui le *driving forces* sono implementate nei modelli).

Ogni modello, infatti, utilizza opportuni 'coefficienti di pesatura' per trattare le *driving forces* selezionate (popolazione, prodotto interno lordo e sviluppo tecnologico) che portano ad avere in uscita scenari completamente diversi fra loro, come verrà evidenziato nei paragrafi successivi.

Su queste basi la scelta del modello adatto per l'individuazione della domanda energetica futura non è semplice. L'unica via è di trovare una giustificazione ragionevole per i dati adottati nello scenario. I modelli adottati dall'IPCC, maggiormente interessanti per lo studio degli scenari nucleari sembrano essere il modello MESSAGE ed il modello MiniCAM. Il primo perché cerca di mantenere una certa continuità con i dati storici, mentre il secondo in quanto tratta nel dettaglio la fonte energetica nucleare. Ad ogni modo anche gli altri modelli forniscono indicazioni per lo sviluppo del nucleare ma l'analisi a posteriore dei dati forniti porta ad avere non pochi dubbi circa il modo con cui questa tecnologia è stata presa in considerazione.

Ad ogni modo è interessante spendere alcune parole aggiuntive circa la base comune ai modelli adottati dall'IPCC. Tutti i modelli sono basati su due semplici equazioni note con il nome di *IPAT identity* (Eq. 1) e di *KAYA equation* (Eq. 2). Queste equazioni permettono rispettivamente di valutare l'impatto ambientale (di una certo tipo di scelta) e le emissioni di CO<sub>2</sub> correlate. Sostanzialmente collegano fra loro le maggiori *driving forces* selezionate quali la popolazione, il prodotto interno lordo (Ground domestic Product, GDP, indice dello

sviluppo economico di un paese) e il livello tecnologico di partenza. E' lavorando con queste equazioni che vengono introdotti gli opportuni coefficienti di pesatura richiamati sopra.

$$IPAT = Population \times Affluence \times Technology \quad (1)$$

$$CO_2Emissions = Population \times (GDP/Population) \times (Energy/GDP) \times (CO_2/Energy) \quad (2)$$

I 40 scenari proposti dall'IPCC sono stati organizzati in 4 'famiglie' a seconda che siano orientati maggiormente allo sviluppo economico o alla salvaguardia ambientale o che adottino soluzioni globali o regionali. In Figura 3 e' rappresentato uno schema semplificato di queste famiglie così come proposto dall'IPCC. Nella rappresentazione a forma di albero, le radici, input dell'analisi, rappresentano le *driving forces* (popolazione, economia, tecnologia, energia, uso della terra) e le fronde i possibili scenari considerati. In particolare, una prima classificazione delle famiglie può essere la seguente:

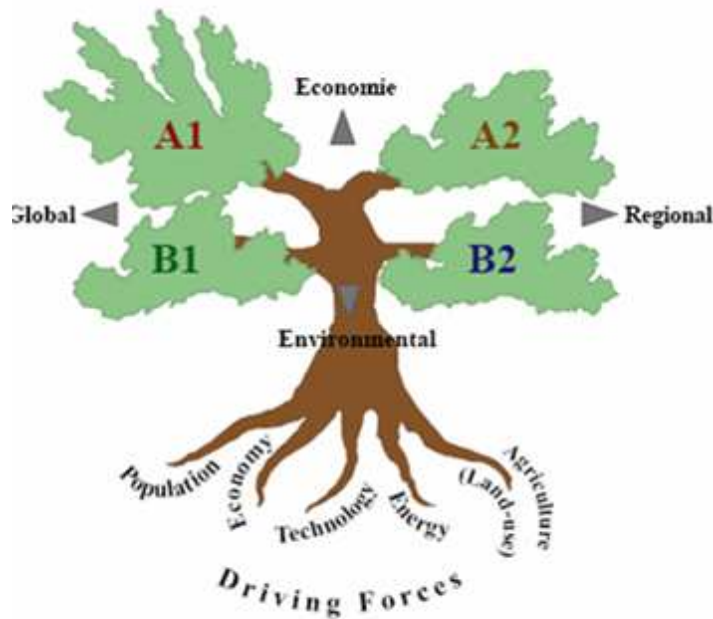


Figura 3: Illustrazione schematica degli scenari SRES: le 4 famiglie vs. driving forces [1]

- A1 - Crescita economica con libera globalizzazione,

- 
- A2 - Crescita economica con grande attenzione agli aspetti locali,
  - B1 - Attenzione all'ambiente adottando soluzioni globali,
  - B2 - Attenzione all'ambiente adottando soluzioni locali.

La scelta di un vasto ventaglio di modelli e di una flessibilità sulle ipotesi iniziali deriva dal fatto di voler ampliare quanto più possibile l'analisi in modo da tener conto delle incertezze sistematicamente presenti.

Questo ventaglio di scelte, però, porta da un lato, ad una più difficile interpretazione dei risultati che poi saranno gli input al calcolo degli scenari nucleari e all'analisi del relativo ciclo del combustibile. Basti pensare che all'interno della stessa famiglia si possono avere risultati completamente diversi a seconda del modello adottato (vedi Figura 4).

In generale, gli scenari proposti si possono suddividere in scenari armonizzati (*Harmonized Scenarios - HS*) e scenari alternativi (*Others Scenario - OS*), questi ultimi inseriti per tenere conto, all'interno della famiglia stessa, delle incertezze relative alle ipotesi di partenza.

Prima di descrivere alcuni esempi a riguardo, è bene evidenziare che qualunque sia il set di dati scelto, esso sarà affetto da errori sistematici come indicato già in precedenza.

La via di procedere sarà allora quella di considerare i dati maggiormente plausibili per la tecnologia scelta, dove la plausibilità è data dalla conoscenza ad esempio dei trends di crescita storici relativi alla stessa tecnologia. Seppur esistendo queste problematiche, risulta essere auspicabile l'uso di dati internazionalmente disponibili anziché la definizione di uno scenario a se stante.

Prendiamo ad esempio il caso Europeo, caso di interesse per lo studio perché gli scenari proposti per l'Italia andranno ad inserirsi in questo panorama. Per quanto riguarda i dati forniti dall'IPCC, per l'Europa si farà riferimento alla macro-regione denominata OECD90. Ovviamente Europa ed OECD90 non sono completamente assimilabili, ma questa approssimazione risulta essere accettabile.

Andando a considerare le proiezioni relative all'OECD90 a seconda delle famiglie proposte dall'IPCC (e quindi degli approcci) è evidente quanto gli scenari siano diversi fra loro, sia in termini di domanda energetica coperta da nucleare che di emissioni totali. Allo stesso modo però, all'interno della stessa famiglia (ad esempio B2, la famiglia orientata all'ambiente e alle soluzioni regionali per salvaguardarlo) si avrà comunque una grande variazione dei risultati dovuta al modello scelto.

Per fare alcuni esempi si faccia riferimento alla Figura 5 dove è rappresentata la variazione della domanda energetica per l'OECD90 (coperta attraverso l'uso del nucleare) al variare della famiglia (per ogni famiglia sono stati scelti i dati relativi allo scenario illustrativo come

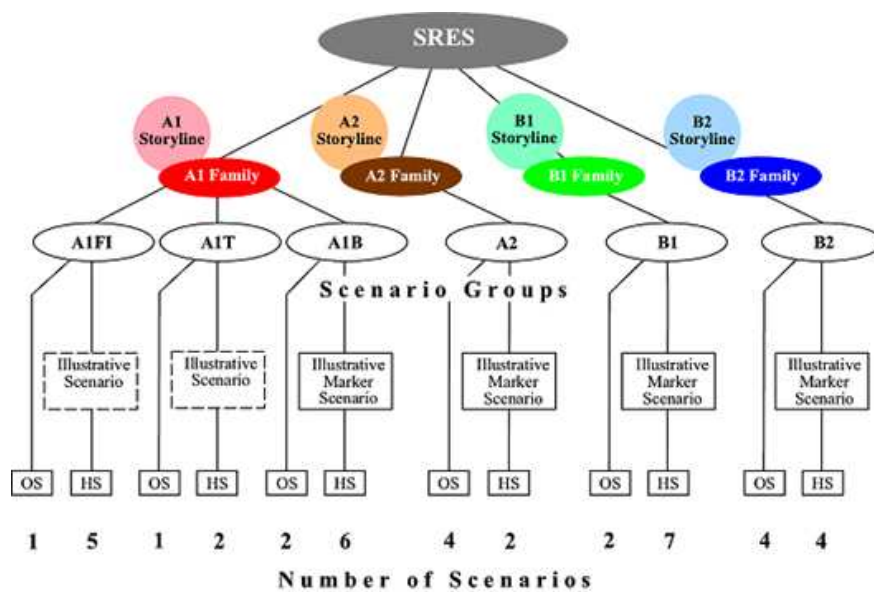


Figura 4: Suddivisione degli scenari all'interno delle famiglie [1]

indicato da [1]). In Figura 6 e' riportata la variazione della domanda energetica all'interno di un'unica famiglia (B2) a seconda del modello adottato per calcolarla (tutti e 6 i modelli citati in precedenza sono stati considerati). Come ulteriore spunto per l'analisi si faccia riferimento anche alla Figura 7 dove e' rappresentato l'andamento della domanda energetica nucleare attraverso le varie famiglie valutato attraverso un unico modello di riferimento (modello MESSAGE).

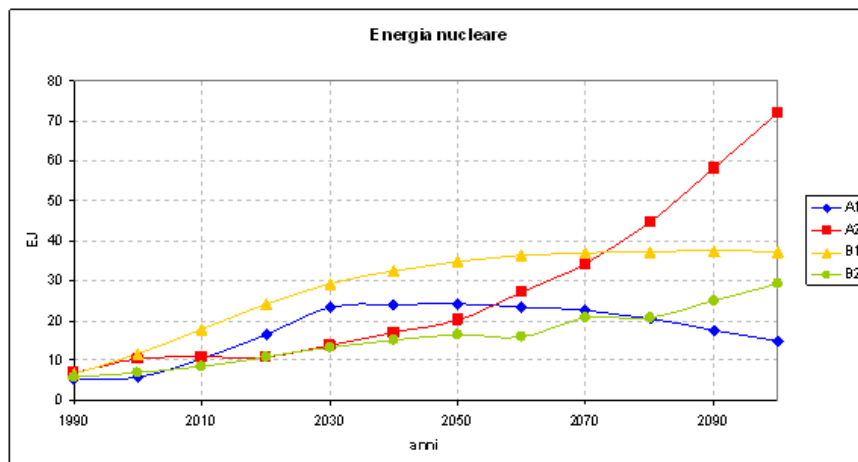


Figura 5: OECD90 vs famiglie (dati relativi ai marker scenarios)

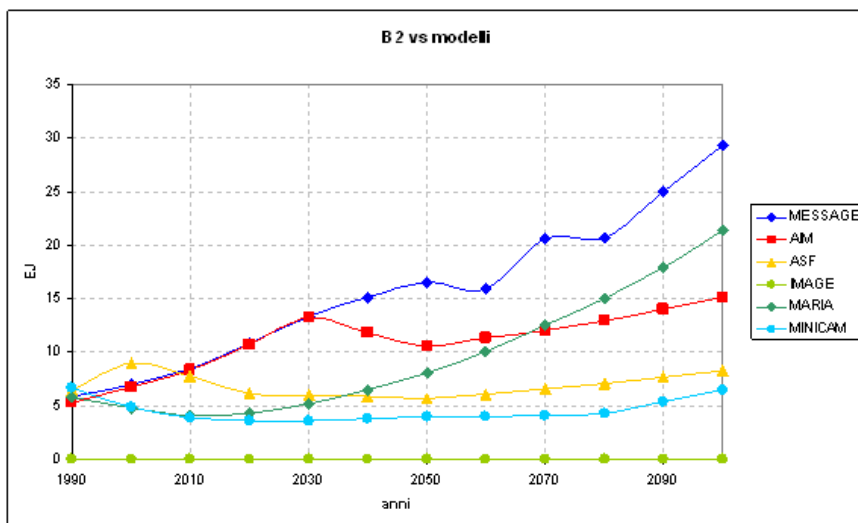


Figura 6: Variazione della domanda energetica all'interno di un'unica famiglia (B2) vs il modello adottato

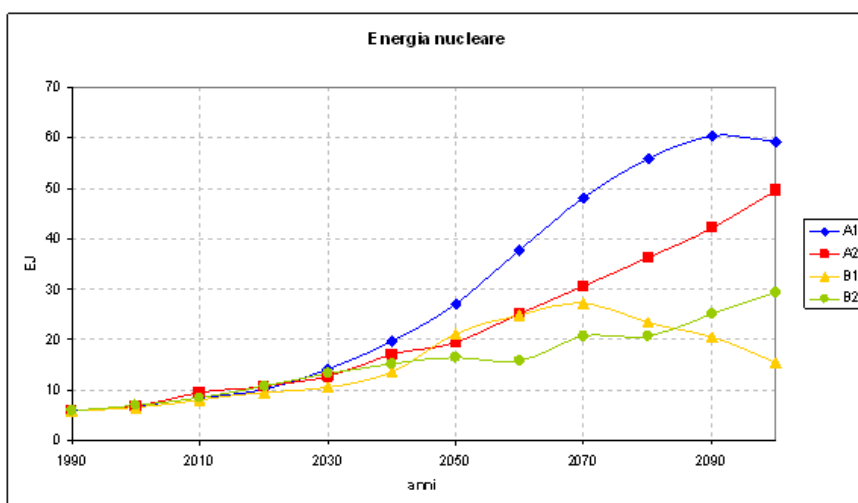


Figura 7: OECD90 vs famiglie (dati relativi al modello MESSAGE)

---

Come evidente dalle Figure 5, 6 e 7 la variazione delle proiezioni al 2100 e' molto ampia sia nel caso si vadano a considerare i dati relativi ai modelli assunti come marker della famiglia (Figura 5) sia si faccia riferimento ad un solo modello (Figura 7). Nel primo caso si e' assunto per la famiglia B1 che i dati relativi alla produzione elettrica attraverso fonti non fossili coincidessero tutti con il nucleare, non fornendo il modello IMAGE nessuna indicazione tipica per il nucleare. Nel secondo caso si e' scelto di adottare il modello MESSAGE (sviluppato dalla IIASA) come modello di riferimento per confrontare le varie famiglie. Naturalmente le famiglie A1 e A2, più orientate allo sviluppo economico forniscono proiezioni di energia al 2100 più elevate (circa il doppio rispettivamente delle famiglie B1 e B2). Come si evince da Figure 7, adottando lo stesso modello si ottiene per tutte le famiglie un andamento comparabile fino al 2030, perché e' il periodo di tempo maggiormente influenzato dai trend storici passati, ma a partire da quella data si ha una completa diversificazione. In particolare due andamenti sono maggiormente discutibili rispetto agli altri: l'andamento A1 perché troppo ottimista per Paesi membri dell'OECD e l'andamento B1 perché presenta uno strano comportamento (un massimo) intorno al 2070. Il primo risulta troppo ottimista se si tiene in considerazione il livello di sviluppo dei paesi OECD e il grado di elettrificazione già elevato, e dove la crescita demografica attesa (valori abbastanza limitati) non giustifica un tale incremento, il secondo perché il massimo al 2070 indica che i paesi OECD avranno una crescita del nucleare tra il 2030 e il 2070 per poi avere una drastica riduzione, andamento non giustificabile se la vita media dei reattori in fase di costruzione e di futuro sviluppo (circa 60 anni) viene tenuta in considerazione adeguatamente.

Particolarmente interessante e' il confronto, all'interno della stessa famiglia, dei risultati ottenibili con i vari modelli così come riportato in Figura 6. In questa figura si ritrova la suddivisione tra i due gruppi di scenari: gli scenari armonizzati, HS (calcolati attraverso i modelli MESSAGE, AIM, ASF e IMAGE) e gli scenari 'others', OS (calcolati attraverso i modelli MiniCAM e MARIA). I primi raggiungono valori più elevati al 2100 (nel range dei 25 EJ) eccetto che per il modello proposto da IMAGE che non tiene in considerazione l'utilizzo dell'energia nucleare. I secondi invece mantengono pressoché invariata la produzione elettrica nucleare ai valori del 1990.

Anche in questo caso si possono evidenziare andamenti discutibili sulla base sia dell'attuale produzione elettrica nucleare che sulle politiche energetiche di alcuni grandi paesi 'nucleari' (es. Francia), presenti nel gruppo OECD90.

L'andamento proposto attraverso il modello MiniCAM e quello proposto attraverso ASF non prevedono un incremento della produzione nucleare. Questo e' contrario alla maggior parte delle politiche energetiche proposte dai paesi membri dell'OECD, in aggiunta l'ASF ha

---

uno strano andamento con un massimo nel 2000, valore massimo per niente in accordo con i dati storici relativi al periodo. Altro particolare andamento è quello dell'AIM che seppur crescendo al 2100 (triplicando il valore raggiunto nel 1990) ha il solito strano massimo intorno al 2030, massimo non giustificabile per la tecnologia nucleare. L'andamento descritto attraverso il modello MESSAGE risulta accettabile con una crescita a gradini della domanda, così come l'andamento proposto con il codice MARIA dove si tiene conto di una riduzione iniziale della potenza nucleare installata, riduzione che tiene conto delle passate politiche energetiche in materia nucleare (infatti, tanti Stati hanno votato leggi per il phasing-out dalla produzione nucleare, riaprendo poi alla discussione) ma che comunque è limitata al 2010, dove poi si ha invece un sostanziale incremento di tale produzione.

Da quanto riportato sopra, è evidente dunque quanto non sia facile la scelta della domanda energetica da adottare. Per questo motivo in genere si risolve scegliendo due andamenti che siano quanto più ragionevoli possibili e tali da essere condizioni al contorno per le evoluzioni energetiche. Prima di procedere allo studio dello scenario italiano, verranno presi a riferimento anche i dati forniti dall'IIASA e confrontati con quelli dell'IPCC.

### **3.1.2 Proiezioni dell'International Institute for Applied Systems Analysis - IIASA**

Nel 1998 l'IIASA, *International Institute for Applied Systems Analysis* con sede a Vienna, ha fornito alla comunità scientifica una serie di proiezioni energetiche mondiali per il periodo 1990-2100 [10]. La suddivisione adottata dall'IIASA è in accordo con quella adottata dall'IPCC (vedi Par. 3.1) seppur il raggruppamento considerato è leggermente differente: invece delle 4 macro-regioni, l'IIASA considera 3 gruppi sulla base dello sviluppo economico-industriale: paesi industrializzati, paesi che stanno riformando la propria economia e paesi in via di sviluppo.

Ad ogni modo, fornendo i dati anche per le 11 zone considerate (tutte zone con caratteristiche di sviluppo e storiche assimilabili) e riportate anche in Figura 2, è immediato risalire alla suddivisione in macro-regioni adottata dall'IPCC e confrontare le due serie di dati, come in seguito riportato.

La IIASA fornisce anch'essa un ventaglio di scenari. Tali scenari sono classificabili in 3 gruppi: gruppo 'A', gruppo 'B' e gruppo 'C'. Il gruppo 'A' presenta un futuro con uno sviluppo tecnologico ed economico molto elevato (nuove tecnologie implementate nel breve periodo, grande crescita economica e relativi bisogni energetici per i paesi in via di sviluppo (PVS), etc). Il gruppo 'B' descrive un futuro meno ambizioso rispetto al gruppo 'A', quindi forse più realistico, per quanto riguarda gli sviluppi tecnologici ed economici. Il gruppo 'C' presenta un futuro governato e trainato dalla eco-sostenibilità. Include infatti sia

---

un sostanziale progresso tecnologico che uno sviluppo della collaborazione internazionale centrata principalmente sulla protezione ambientale e sull'equità internazionale (scambio di tecnologie fra i paesi industrializzati e i PVS).

Il ventaglio totale degli scenari proposti dall'IIASA consiste nei seguenti 6:

- *B Middle Course*, non particolarmente ambizioso;
- *A1 High growth*, orientato all'uso di petrolio e gas come fonti energetiche principali;
- *A2 High growth*, ritorno al carbone;
- *A3 High growth*, phaseout dell'utilizzo di sorgenti energetiche fossili;
- *C1 Ecologically driven*, nuove rinnovabili (estensione uso pannelli solari e fotovoltaici) con phaseout del nucleare;
- *C2 Ecologically driven*, rinnovabili e sviluppo ed utilizzo del nuovo nucleare (reattori IV generazione).

Il sistema di calcolo adottato dall'IIASA include il modello MESSAGE già citato precedentemente ed adottato anche dall'IPCC stesso per alcuni dei suoi scenari. Per questo motivo alcune similitudini fra i dati reperibili dai due enti sono attese. Un modello semplificato dello schema di calcolo dell'IIASA e' rappresentato in Figura 8, dove si evidenzia la centralità dell'uso del modello MESSAGE.

Anche in questo caso l'attenzione verrà diretta all'Europa. Una prima analisi da compiere, e' il confronto dei vari scenari proposti per l'OECD90 (dove sono stati raggruppati insieme Europa Occidentale, stati OECD del Pacifico e Nord America). Tale confronto, per quanto riguarda la fonte nucleare, e' riportato in Figura 9. Molti degli andamenti riportati sembrano alquanto discutibili. E' interessante, infatti, notare come lo scenario B (*Middle Course*) sembri essere il più ragionevole, dove l'utilizzo dell'energia nucleare cresce gradualmente raggiungendo a fine secolo valori intorno ai 30 EJ, elevati ma non eccessivi. Altri interessanti scenari sono il C1 e il C2. Essi infatti considerano il nucleare nel seguente modo: il primo considera una chiusura graduale con diminuzione a partire dal 2030, mentre il secondo considera l'uso del nuovo nucleare (dove non e' chiaro a cosa si faccia riferimento nel dettaglio, ma si assume siano i reattori di IV generazione e eventualmente la fusione) seppure verso fine secolo venga considerato come in fase di phasing out.

Andando a confrontare fra loro lo scenario B-IIASA e lo scenario B2-MESSAGE si evidenziano molte similitudini (entrambi infatti si basano su MESSAGE, seppur i dati di

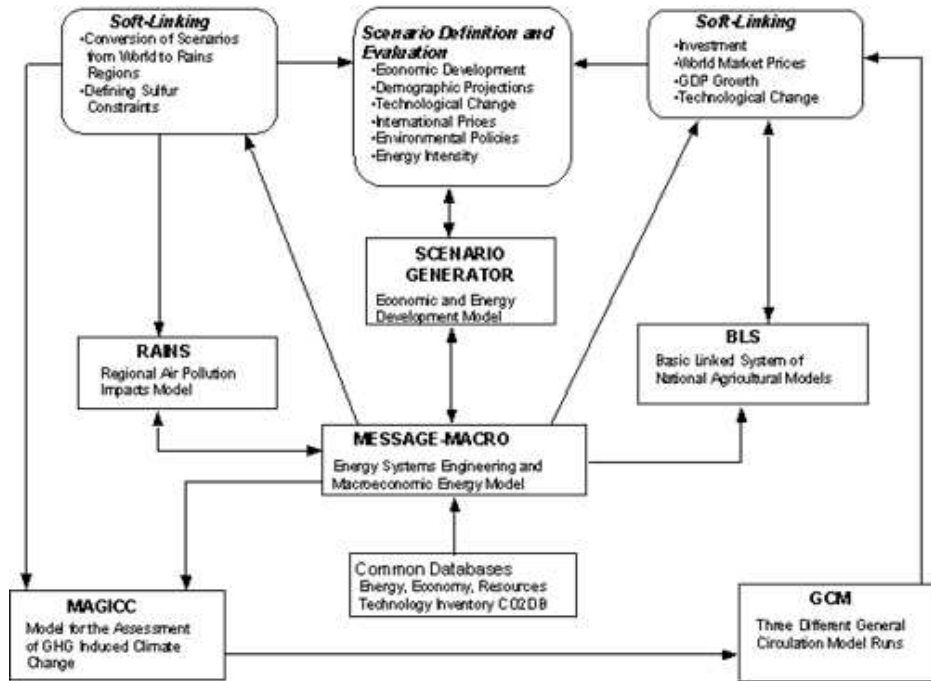


Figura 8: Schema semplificato del modello di calcolo adottato dall'IIASA, modello centrale: MESSAGE

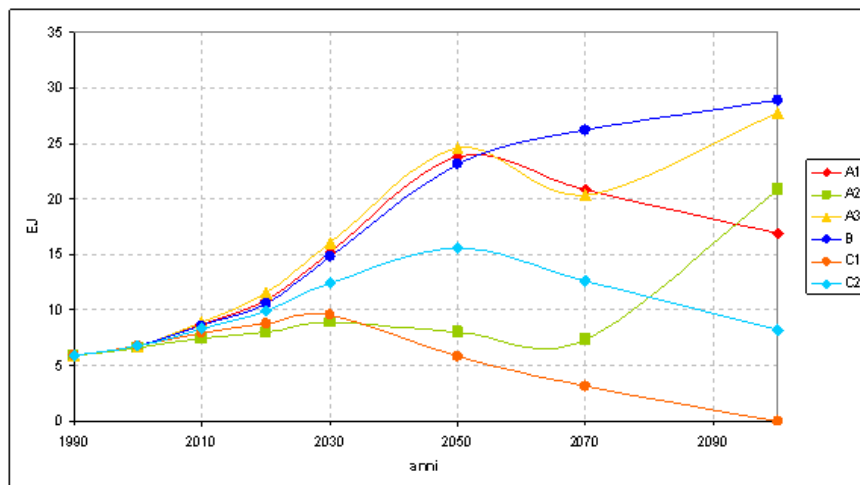


Figura 9: Confronto fra gli scenari proposti dall'IIASA [OECD90]

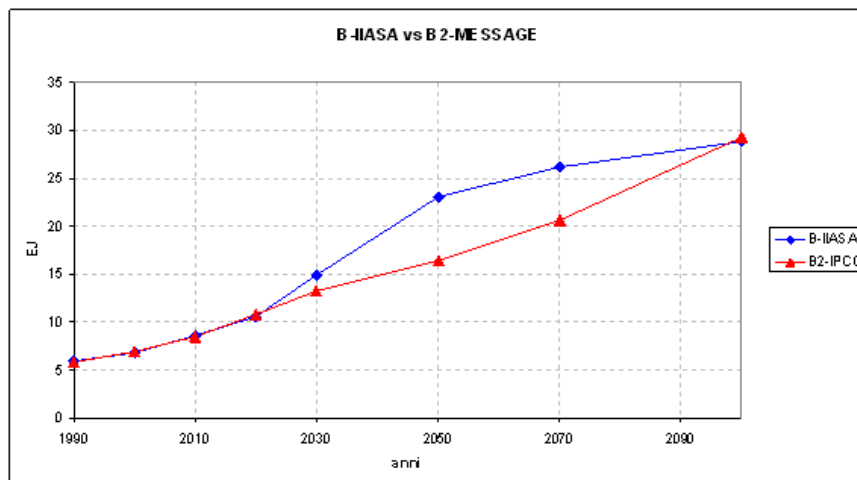


Figura 10: Confronto fra lo scenario B-IIASA e lo scenario B2-IPCC [modello di riferimento: MESSAGE]

input siano differenti). Essi mostrano crescite differenti nel periodo 2060-2080 ma al 2100 hanno valori completamente comparabili, come indicato in Figura 10.

Se l'attenzione viene ristretta solo all'Europa Occidentale (WEU) gli andamenti relativi ai dati dell'IIASA sono riportati in Figura 11. Gli scenari A1, A2 e B hanno andamenti di crescita ragionevoli e mostrano 3 possibili ratei di crescita del nucleare in Europa, mentre lo scenario C2 seppur ragionevole fino al 2050 non tiene conto in maniera adeguata della vita dei reattori installati e porta ad avere un un massimo intorno al 2050, andamento poco giustificabile (per ragioni già precedentemente indicate).

Da questa analisi e' evidente come la scelta della domanda energetica da utilizzare come condizione al contorno non sia una scelta di facile interpretazione. Per questo motivo in una prima fase del lavoro, così come indicato in [5] , si e' ristretta l'analisi al 2050 imponendo la continuità con i dati storici. Questo pero' limita da un lato il tipo di studio fattibile perché non si può andare ad evidenziare il contributo apportato dall'uso di reattori veloci (es. confronto di sistemi con diverse capacità di breeder) in termini di risorsa salvata (U saving) o di stabilizzazione dei rifiuti prodotti. La scala temporale al 2100 sembra la più adeguata anche se un'estensione al 2200 può essere anch'essa considerata (in modo da analizzare le condizioni di equilibrio della flotta veloce) magari mantenendo costante la domanda nell'intervallo 2100-2200.

E' ovvio che la scelta delle ipotesi da inserire influenza l'analisi dello scenario in maniera considerevole, quindi tutto il processo a monte e' di particolare importanza per giustificare

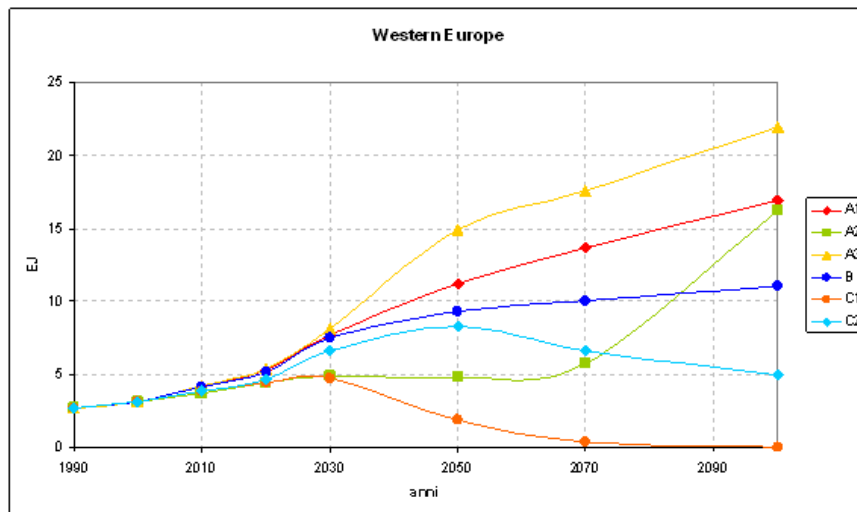


Figura 11: Confronto fra gli scenari proposti dalla IIASA per l'Europa occidentale [WEU]

le scelte fatte poi nel ciclo del combustibile per quanto riguarda i reattori da inserire e la strategia con cui inserirli. Questa breve parentesi circa la definizione della domanda energetica vuole essere un richiamo all'attenzione circa la scelta delle ipotesi da adottare in questo tipo di analisi.

### 3.2 Esempio di scenario mondiale - ENEA

Prima di descrivere un'applicazione preliminare al caso italiano della metodologia descritta nel Par. 2, può essere interessante analizzare lo studio presentato da ENEA al Congresso Nuclear Energy for New Europe (NENE) 2009 [11], e riportato integralmente in Appendice B. Dai risultati ottenuti e presentati da ENEA, è evidente quanto la scelta delle ipotesi alla base degli scenari sia importante, vedasi ad esempio la domanda energetica da applicare nel caso di scenario mondiale o europeo.

L'obiettivo del lavoro è massimizzare lo sviluppo dei reattori veloci andando ad investigare la disponibilità di uranio e plutonio in funzione della domanda energetica scelta alla base dello scenario mondiale ed europeo. Per analizzare le risorse coinvolte, ENEA ha adottato il codice di scenario DESAE [19] sviluppato all'interno del progetto INPRO [12] dell'IAEA.

In Appendice B sono riassunte nel dettaglio tutte le ipotesi adottate da ENEA. In particolare le domande energetiche adottate per lo scenario Europeo (due proiezioni fra cui un caso con domanda costante) e per lo scenario mondiale (un unico caso con domanda energetica crescente) sono state descritte nel dettaglio. In entrambi i casi la scala temporale adottata è

---

estesa fino al 2150 in modo da analizzare nel dettaglio il pieno sviluppo dei reattori veloci.

Rilasciando la trattazione dettagliata del lavoro all'Appendice B, e' possibile evidenziare che uno dei punti fondamentali emersi dallo studio riguarda la 'teoretica' non limitazione di sviluppo dei veloci da parte dell'Europa (assumendo una capacita' di riprocessamento costante e paria 3000 t/yr) sia nel caso di domanda costante (scenario R1) che di domanda crescente (scenario R2) mentre per quanto riguarda il caso mondiale una limitazione esiste sia in termini di risorsa disponibile (U naturale) che di capacita' di fabbricazione e riprocessamento del combustibile.

E' evidente come in questo caso la scelta delle ipotesi rimane un punto centrale negli studi di scenario comportando un non trascurabile effetto sui risultati ottenuti.

## 4 Caso studio: Scenario Italiano

Prima di entrare nel dettaglio dello studio di un caso specifico, si e' voluto fornire una visione di insieme circa la metodologia da adottare nelle analisi di scenario (ampliando alcuni punti critici come la scelta delle domande energetiche future) per sottolineare l'importanza delle condizioni al contorno per la definizione degli scenari e per la gestione delle problematiche collegate.

Come già indicato la definizione degli scenari, e il grado di dettaglio con cui vengono fornite le condizioni al contorno, dipende dall'oggetto dello scenario considerato: un singolo stato, un area omogenea (es. Europa) o il Mondo nel suo complesso. A seconda infatti dell'oggetto sarà più importante considerare la continuità con l'andamento storico seguito da una certa fonte o le decisioni politiche in materia di sviluppo energetico, oppure l'analisi delle *facility* necessarie a sostenere l'intero ciclo o il totale delle risorse coinvolte (magari andando a considerare anche le risorse impegnate per tutta l'intera vita dei reattori). Approcci che comunque dovranno essere complementari.

Andando ad analizzare scenari per i singoli paesi si partirà dalla conoscenza della potenza installata nel paese, dalla politica adottata (continuare con il nucleare o andare in phase-out), si definirà quindi un certo trend della domanda nucleare (ad esempio basandosi sui dati dell'IAEA che forniscono scenari HIGH e LOW [4]) che dovrà essere seguito attraverso una strategia di sostituzione dei reattori che tenga conto della vita dei reattori in esercizio e dell'eventuale *Plant Extension Life* (PLEX).

Un esempio di tale sostituzione può essere il caso spagnolo, dove la Spagna dal 2003 ha una politica di phase-out dal nucleare. Nello scenario considerato si assume che la decisione circa l'uso del nucleare venga rivista. A partire infatti dal 2023 (anno in cui tutti i reattori

spagnoli dovrebbero essere messi in phase-out) sono stati applicati i trends di crescita (HIGH and LOW) forniti dall'IAEA (Figura 12, Tabella 2). In Figura 13 e' invece riportata la sostituzione dei reattori di II generazione in esercizio con i reattori di III generazione (EPR a breve termine) e di IV generazione (ELSY-oriented a partire dal 2040). Un'ottimizzazione per il periodo 2025-2030 deve essere applicata in modo da evitare l'andamento irregolare indicato in Figura 13 (ottimizzazione percorribile ammettendo il PLEX per alcuni dei reattori in esercizio o variando il rateo di introduzione degli EPR).

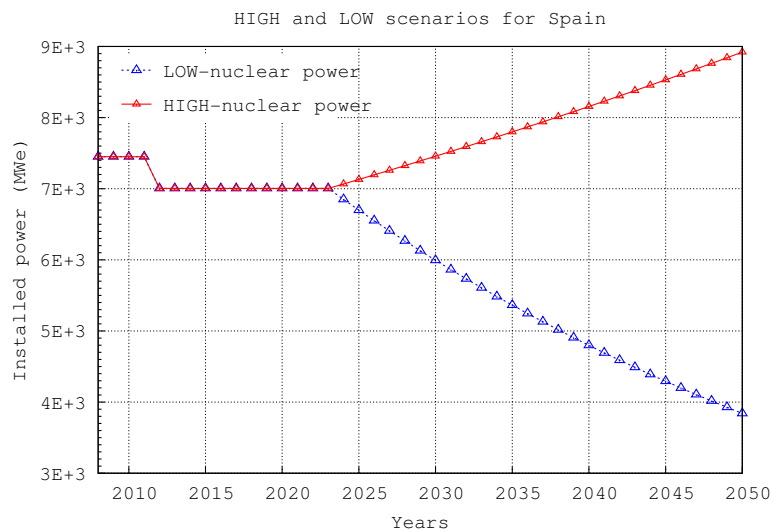


Figura 12: Scenario HIGH (linea rossa) e LOW (linea blu) per la Spagna, periodo 2008-2050

Situazione diversa si ha per i paesi, come l'Italia, dove una rinascita nucleare e' in corso. Infatti, in questi paesi non si può applicare nessun criterio di continuità con i dati storici e nessun andamento medio (es. Europeo) relativo al breve termine, perché lo sviluppo del parco macchine nucleare potrà avere andamenti di crescita più elevati rispetto al valore medio. Eventualmente dopo il raggiungimento di una qualche condizione di equilibrio, anche in questi paesi sarà possibile applicare i trend Europei medi.

Per questo motivo possiamo considerare il caso italiano come un caso limite in cui ha maggior peso la parte delle dichiarazioni politiche circa i reattori da installare che rispetto all'andamento di crescita medio europeo definito dai valori annuali medi di Tabella 2.

Prima però di descrivere le ipotesi fatte per il caso italiano ed i risultati preliminari ottenuti, può essere interessante (sia per testare il codice di calcolo utilizzato, NFCSS dell'IAEA, che per avere un'idea dei rifiuti prodotti e delle risorse utilizzate in Italia nel periodo

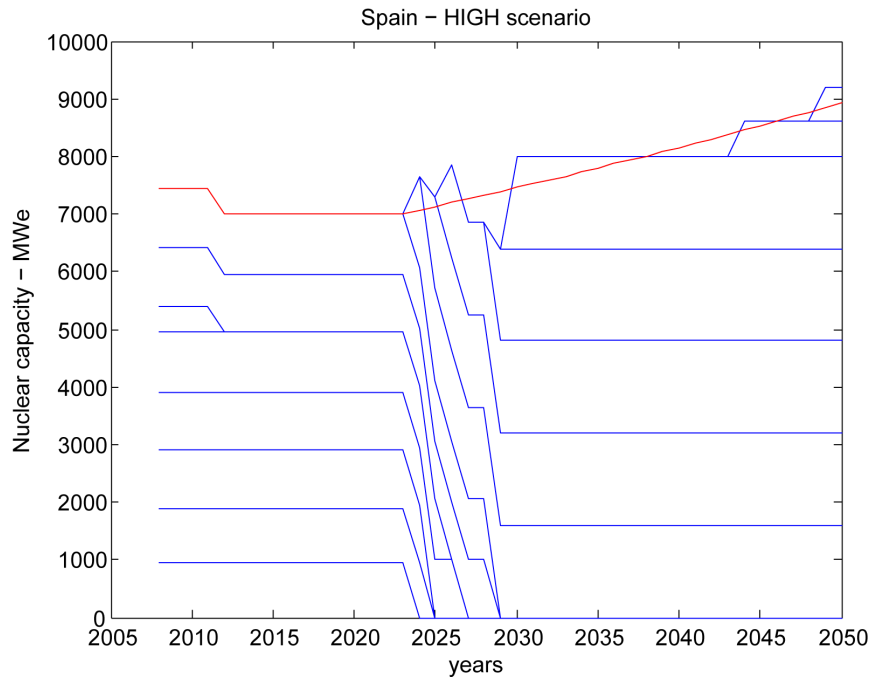


Figura 13: Scenario HIGH Spagna: possibile sostituzione del parco macchine per coprire la domanda HIGH ipotizzata

di produzione elettrica-nucleare) andare a simulare lo scenario storico italiano (1963-1989), in modo da avere ad ogni modo come punto di partenza, la conoscenza della situazione del Paese.

#### 4.1 Scenario Storico: 1963-1990

Nel periodo che va dal 1964 e 1990 sono stati eserciti 4 reattori nucleari in Italia che hanno fornito un quantitativo di energia pari a circa 90000 GWh e nel complesso (in Tabella 3 sono riportati i dati per reattore).

| NPP        |     | MWe net | Periodo   | GWh e   |
|------------|-----|---------|-----------|---------|
| Latina     | GCR | 153     | 1964-1987 | 25489.2 |
| Garigliano | BWR | 150     | 1964-1982 | 12246.0 |
| Trino      | PWR | 260     | 1965-1990 | 24307.1 |
| Caorso     | BWR | 860     | 1981-1990 | 27725.8 |

Tabella 3: Dati storici Italia [2]

Nonostante il fatto che l'Italia fosse una delle maggiori potenze nucleari agli inizi degli anni '60, la frazione di energia coperta da questa fonte e' rimasta sempre al di sotto del 5%,

come indicato in Figura 14 per tutto il periodo 1963-1989 (Dati Storici Terna [2] ). Il valore medio e' intorno ai 2.6%, con il massimo raggiunto nel 1986 (valore pari al 4.5%).

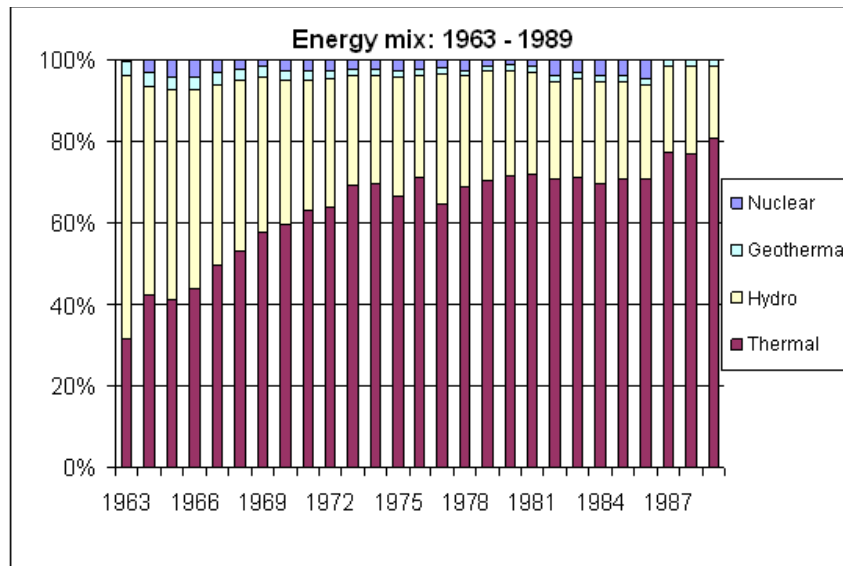


Figura 14: Mix energetico in Italia periodo 1963 - 1989 [2]

Basandosi sui dati reperibili reattore per reattore dal database PRIS (*Power Reactor Information System*) dell'IAEA [3] e' stato possibile ricreare nel dettaglio, attraverso il codice di calcolo NFCSS, lo scenario italiano nel periodo storico considerato. Ad esempio si vedano Figura 15 e Figura 16 dove sono riportati gli input al codice con il fattore di carico variabile anno per anno rispettivamente per il reattore di Latina (GCR) e per il reattore di Caorso (BWR). Per maggiori dettagli relativi ai dati inseriti si rimanda all'Appendice A.

Come sar  poi evidenziato dall'analisi dei risultati forniti dalle simulazioni l'*irradiation history* dei vari reattori e' stata riprodotta nel dettaglio, prendendo in considerazione le grandi variazioni avute per quanto riguarda il fattore di carico e la potenza installata. Un esempio di queste variazioni e' riportato in Figura 17. In Figura 17 le variazioni dei fattori di carico per i singoli reattori sono evidenti (dei 4 reattori solo Latina, linea rosa in Figura 17, ha avuto un andamento abbastanza regolare).

Tenendo conto della variazione del fattore di carico, i risultati forniti dalla simulazione con il codice NFCSS relativamente all'energia prodotta mostrano un andamento molto irregolare (come indicato in Figura 18), dovuto a periodi prolungati di shut-down dei reattori per manutenzione o potenziamento. Infatti, anche la potenza installata non e' rimasta costante, seppur abbia un andamento molto pi  regolare, come indicato in Figura 19. Tali variazio-

| GENERAL CHARACTERISTICS |                      | FUEL TYPE 1            | FUEL TYPE 2             | FUEL CYCLE      | INITIAL VALUES  |                 |                     |                       |
|-------------------------|----------------------|------------------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------|
| DataYear                | AddedCapacity<br>MWe | RemovedCapacity<br>MWe | NetTotalCapacity<br>MWe | Efficiency<br>% | LoadFactor<br>% | TailsAssay<br>% | FuelType2Share<br>% | ResidenceTime<br>year |
| 1963                    | 153.00               | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1964                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1965                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1966                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1967                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1968                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1969                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1970                    | 2.00                 | 0.00                   | 155.00                  | 26.00           | 87.72           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1971                    | 5.00                 | 0.00                   | 160.00                  | 26.00           | 60.31           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1972                    | 0.00                 | 0.00                   | 160.00                  | 26.00           | 85.67           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1973                    | 0.00                 | 10.00                  | 150.00                  | 26.00           | 49.82           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1974                    | 3.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 71.16           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1975                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 70.75           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1976                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 70.43           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1977                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.31           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1978                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 88.41           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1979                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 58.87           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1980                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 66.52           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1981                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 66.81           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1982                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 65.08           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1983                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 95.05           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1984                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 69.42           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1985                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 88.53           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1986                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 84.39           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1987                    | 0.00                 | 0.00                   | 153.00                  | 26.00           | 80.00           | 0.30            | 0.00                | 1                     |
| 1988                    | 0.00                 | 153.00                 | 0.00                    | 0.00            | 0.00            | 0.00            | 0.00                | 0                     |
| 1989                    | 0.00                 | 0.00                   | 0.00                    | 0.00            | 0.00            | 0.00            | 0.00                | 0                     |

Figura 15: Schermata NFCSS: introduzione dati reattore di Latina (GCR)

|      |        |        |        |       |       |      |      |    |
|------|--------|--------|--------|-------|-------|------|------|----|
| 1977 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0  |
| 1978 | 652.00 | 0.00   | 652.00 | 33.00 | 13.15 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1979 | 0.00   | 104.00 | 548.00 | 33.00 | 20.89 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1980 | 0.00   | 0.00   | 548.00 | 33.00 | 25.34 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1981 | 292.00 | 0.00   | 840.00 | 33.00 | 49.86 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1982 | 0.00   | 0.00   | 840.00 | 33.00 | 77.90 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1983 | 33.00  | 0.00   | 873.00 | 33.00 | 56.38 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1984 | 0.00   | 13.00  | 860.00 | 33.00 | 53.81 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1985 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 52.76 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1986 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 70.33 | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1987 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 0.00  | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1988 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 0.00  | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1989 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 0.00  | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1990 | 0.00   | 0.00   | 860.00 | 33.00 | 0.00  | 0.30 | 0.00 | -4 |
| 1991 | 0.00   | 860.00 | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0  |
| 1992 | 0.00   | 0.00   | 0.00   | 0.00  | 0.00  | 0.00 | 0.00 | 0  |

Figura 16: Schermata NFCSS: introduzione dati reattore di Caorso (BWR)

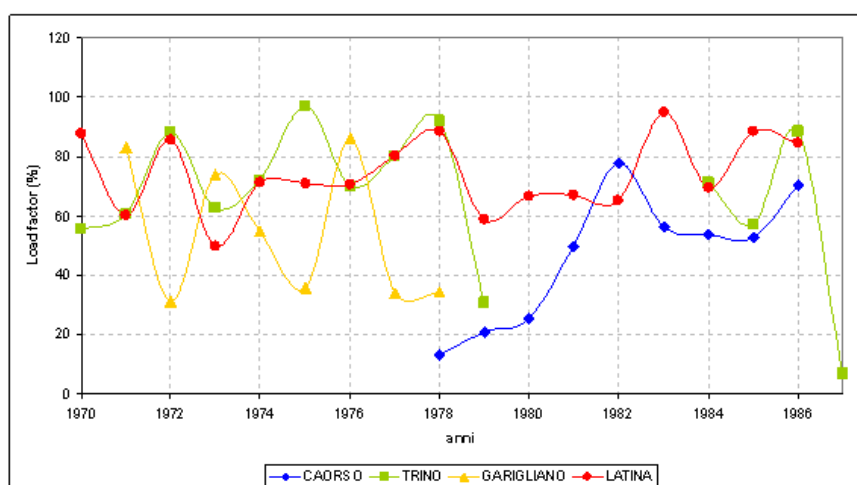


Figura 17: Variazione dei fattori di carico per i reattori italiani (1963-1989). Dati PRIS-IAEA [3]

ni fanno riferimento alle variazioni annuali riportate dal database dell'IAEA e riassunte in Appendice A.

Uno dei parametri fondamentali che ha portato ad analizzare il caso storico e' la definizione dei rifiuti presenti sul territorio italiano ad oggi. Sulla base dei contratti di riprocessamento dell'Italia con l'impianto di Sellafield (UK) per il trattamento del combustibile degli impianti a gas (Latina) e con l'impianto di La Hague (Francia), per il trattamento di combustibile esausto da LWRs, sono state introdotte alcune ipotesi circa la frazione di combustibile riprocessata. Tutto il combustibile in uscita da Latina e' stato riprocessato (come da contratto con Sellafield) così come tutto il combustibile da Trino e da Garigliano (contratto con La Hague). E' stato ipotizzato inoltre di riprocessare tutto il combustibile proveniente da Caorso eccetto quello relativo all'ultimo core.

Sotto tali ipotesi sono stata stimate le quantità di rifiuti ad alta attività (*High Level Waste* - HLW), riportati in Figura 20 e Figura 21, le quantità di rifiuti ad attività intermedia (*Intermediate Level Waste* - ILW), Figura 22 e Figura 23. Tali valori sono i risultati dell'applicazione dei modelli di riprocessamento implementati in NFCSS, uno studio ulteriore circa questi modelli e' in corso.

Da questa analisi, il combustibile rimasto in Italia e non ancora riprocessato risulta essere pari a circa 237 tonHM (vedi Figura 24), cioè una piccola quantità rispetto al totale del combustibile esausto estratto. Ad ogni modo il valore ottenuto dalla simulazione e' in accordo con quanto indicato da SOGIN [20]. In aggiunta, per avere una stima relativa a tutto

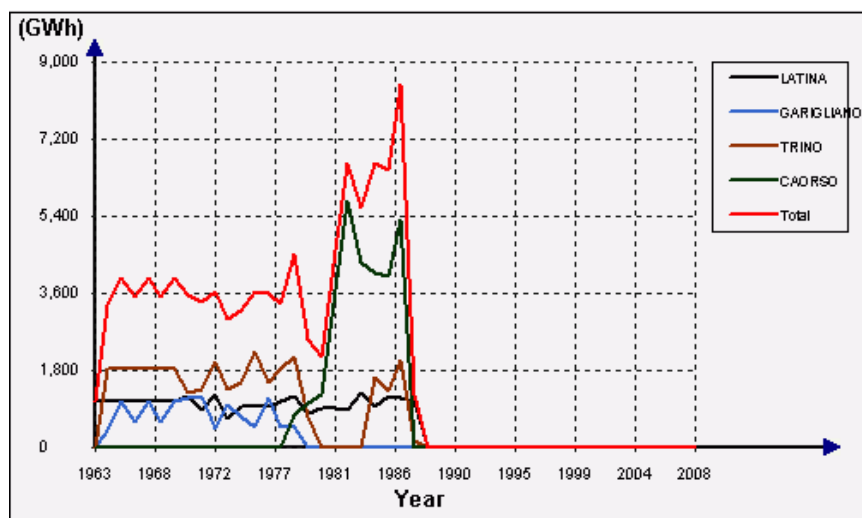


Figura 18: Produzione elettrica italiana da nucleare: periodo 1963-1990

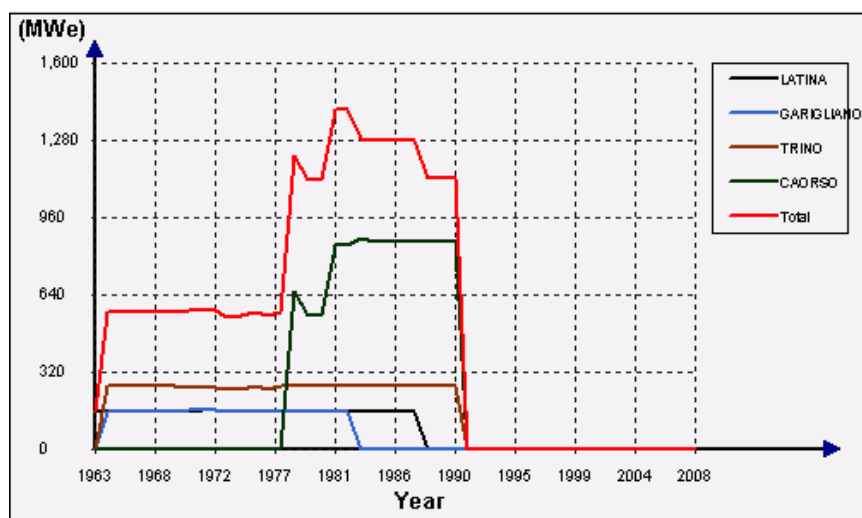


Figura 19: Capacità nucleare installata in Italia nel periodo 1963-1990

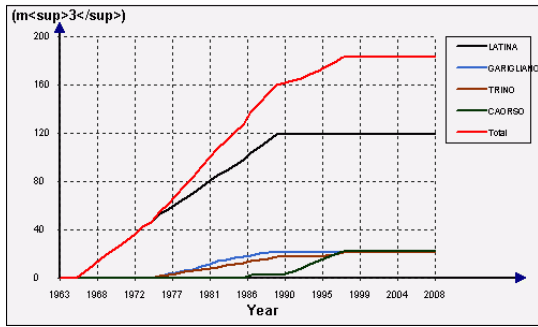


Figura 20: HLW in stock

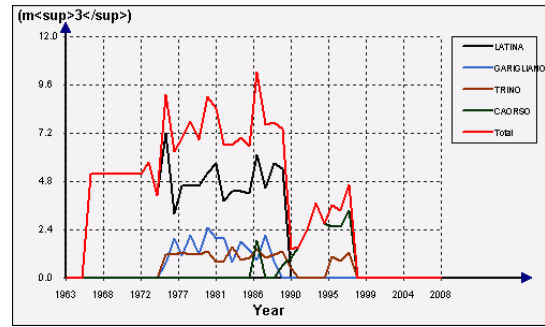


Figura 21: HLW volume annuale prodotto

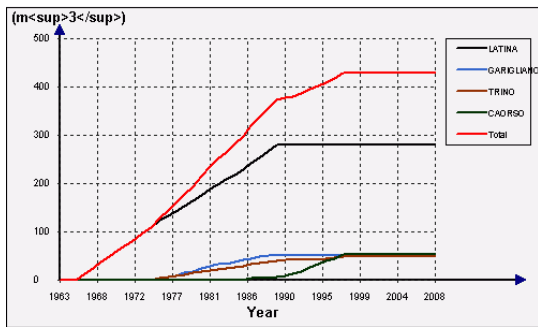


Figura 22: ILW in stock

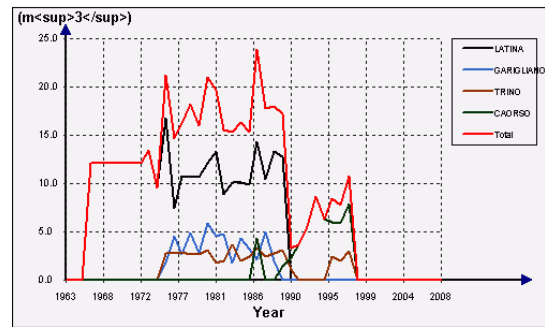


Figura 23: ILW volume annuale prodotto

il combustibile esausto estratto dai reattori (*Spent fuel - SF*) si faccia riferimento alla Figura 25 dove viene riportato il quantitativo di SF che ogni anno va a finire in piscina in attesa di essere riprocessato.

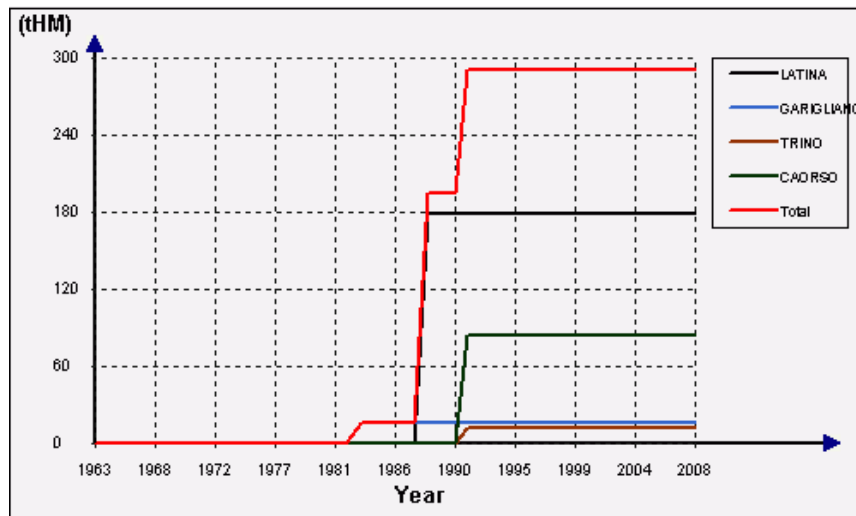


Figura 24: Combustibile esausto presente al 2008 in Italia

## 4.2 Scenari futuri Italia: 2008-2050

Facendo riferimento alla metodologia descritta nel dettaglio in CIRTEN - CERSE 2008 (RL 1051- 2008) [5] e riassunta precedentemente nel paragrafo 2, il primo passo e' andare a definire la domanda energetica futura (in termini di elettricit  richiesta), applicando dei ratei annui medi (e' possibile applicare i valori medi europei per la crescita della domanda elettrica ma non i valori medi per lo sviluppo del nucleare, per quanto gi  descritto precedentemente).

In questa analisi preliminare faremo riferimento ai valori forniti dalla IAEA [4]. In particolare verranno considerati un valore HIGH pari a 2.8% di crescita annua ed un valore LOW pari allo 1.0% di crescita annua per il settore elettrico. Per affinare l'analisi e' stato considerato anche un valore intermedio, chiamato AVEG, pari a 1.9% annuo. Applicando i valori appena indicati si deduce che la domanda elettrica al 2050 sar  pari rispettivamente a 3.2 volte, 1.5 volte e 2.2 volte il valore attuale, come riportato in Tabella 4.

Per lo sviluppo del nucleare, e' necessario dunque aggiungere ulteriori ipotesi specifiche per il caso in studio. Infatti, non e' possibile basarsi sull'et  dei reattori in esercizio e/o sulla continuit  con i dati storici. Si e' pensato dunque, come prima ipotesi di lavoro, di prendere in considerazione i seguenti 3 scenari, riportati anche in Figura 26:

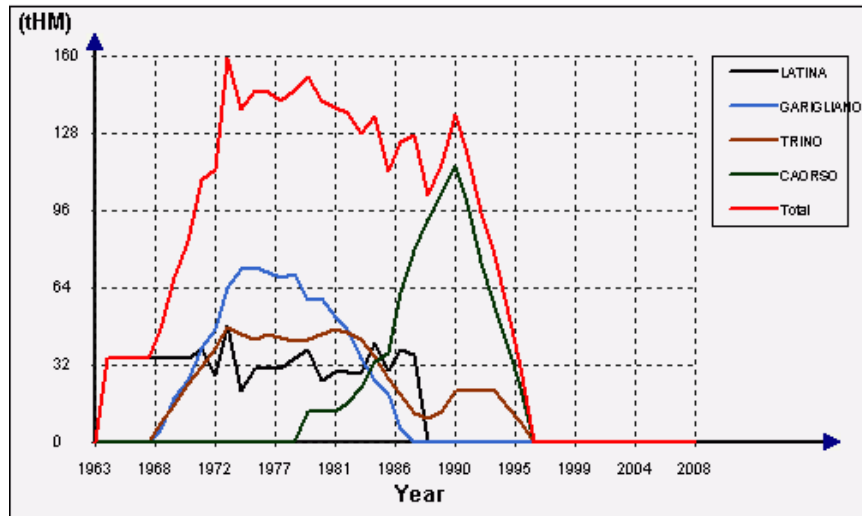


Figura 25: SF inventory in piscina prima del reprocessamento

|      | LOW    | AVEG   | HIGH   |
|------|--------|--------|--------|
| Year | TWhe   |        |        |
| 2008 | 304.62 |        |        |
| 2018 | 336.49 | 367.70 | 401.50 |
| 2023 | 353.65 | 460.95 | 403.99 |
| 2028 | 371.69 | 443.85 | 529.19 |
| 2038 | 410.58 | 535.77 | 697.50 |
| 2045 | 440.19 | 611.22 | 846.25 |
| 2050 | 462.65 | 671.53 | 971.55 |

Tabella 4: Tre possibili *electricity envelops* per l'Italia

- 
- 1) CASO ONE: Introduzione di 4 EPRs (1600 MWe ciascuno) a breve termine (a partire dal 2018) con uso del MOX nel secondo strato: riprocessamento del combustibile esausto e fabbricazione del nuovo combustibile ad ossidi misti;
  - 2) CASO TWO: Introduzione di 8 EPRs (1600 MWe ciascuno) suddivisi in due gruppi: 4 nel 2018 (con stesse caratteristiche del caso ONE) e 4 inseriti a partire dal 2025 (senza uso del MOX sul secondo strato). A seguire a partire dal 2038 e' stata considerata l'introduzione di 3 LFRs (ELSY-oriented, 600 MWe);
  - 3) CASO THREE: Introduzione di 12 EPRs (1600 MWe ciascuno) suddivisi in tre gruppi successivi di 4 unità con installazione successiva di 7 LFRs (ELSY-oriented, 600 MWe) a partire dal 2038.

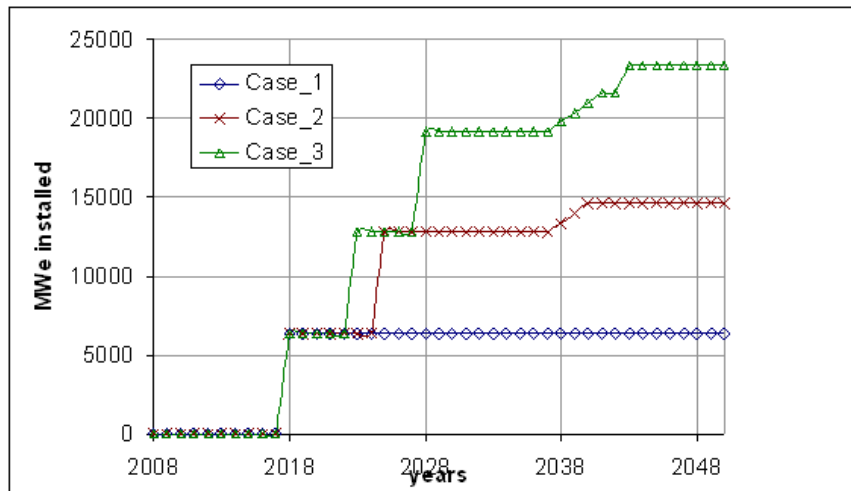


Figura 26: Scenari proposti per il caso italiano

Prima di discutere i risultati ottenuti, si vuole ricordare che tali scenari sono solo una prima ipotesi di lavoro per approcciare lo studio dello scenario italiano (si vedano come facenti parte di uno *scoping study*).

Le frazioni di nucleare relative agli scenari messe a confronto con la domanda energetica sopra definita sono riportate in Figura 27. Tali frazioni sono funzione dei dati adottati per le proiezioni elettriche così come forniti dall'IAEA, ovviamente valori diversi (es. più elevati) possono essere raggiunti se la richiesta di elettricità sarà inferiore alle stime fornite. Questo e' uno degli esempi di come i dati di partenza relativi alla domanda energetica influenzino la definizione degli scenari.

| 2018       |         |         |         |
|------------|---------|---------|---------|
|            | LOW     | AVEG    | HIGH    |
| Case ONE   | 6.86 %  | 6.28 %  | 5.75 %  |
| Case TWO   | 6.86 %  | 6.28 %  | 5.75 %  |
| Case THREE | 6.86 %  | 6.28 %  | 5.75 %  |
| 2038       |         |         |         |
| Case ONE   | 5.62 %  | 4.31 %  | 3.31 %  |
| Case TWO   | 11.78 % | 9.02 %  | 6.93 %  |
| Case THREE | 17.40 % | 13.33 % | 10.24 % |
| 2050       |         |         |         |
| Case ONE   | 4.99 %  | 3.44 %  | 2.38 %  |
| Case TWO   | 11.39 % | 7.84 %  | 5.42 %  |
| Case THREE | 18.25 % | 12.57 % | 8.69 %  |

Figura 27: Frazioni di nucleare sul totale della produzione elettrica

I tre scenari definiti precedentemente sono stati simulati attraverso il codice NFCSS. Come approssimazione, sono state utilizzate le librerie di sezioni d'urto ad un gruppo presenti nel codice stesso sia per gli EPR (libreria relativa al PWR) sia per il veloce (libreria relativa al LMFR). Attualmente la definizione di librerie specifiche è in corso. Infatti solo la simulazione dell'intero ciclo e il bilancio delle masse fra le varie facility (sia nel *front-end* che nel *back-end*) può fornire dati utili al confronto fra le varie strategie.

#### 4.2.1 Scenario ONE

Nello studio degli scenari futuri si è ipotizzato un fattore di carico costante (pari all'85 % per gli EPR) tale da portare nel primo caso, 4 EPRs installati a partire dal 2018 (Figura 28), ad una produzione elettrica annuale di circa 50000 GWh/annui, come indicato in Figura 29. Valore in grado di coprire solo il 5% dei fabbisogni elettrici al 2050 così come indicato anche in Figura 27. In questo scenario è stato considerato l'uso del combustibile ad ossidi misti (MOX) solo per un limitato periodo di tempo, dal 2030-2038. Si tratta di un'ipotesi accademica per vedere quanto l'uso dei MOX permetta di risparmiare la risorsa primaria (uranio). Come indicato in Figura 30, l'uranio salvato dall'uso dei MOX è una percentuale abbastanza limitata rispetto alle risorse di uranio coinvolte in questo scenario (in Figura 31, sono riportati i valori annuali).

Per quanto riguarda poi una stima dei rifiuti prodotti si faccia riferimento all'inventario del combustibile in piscina come indicato in Figura 32.

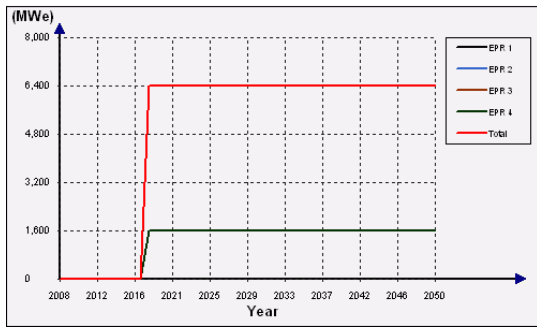


Figura 28: Capacità installata scenario ONE, fattore di carico costante

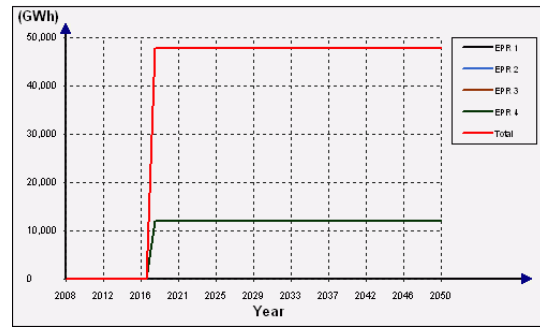


Figura 29: Elettricità prodotta annualmente scenario ONE

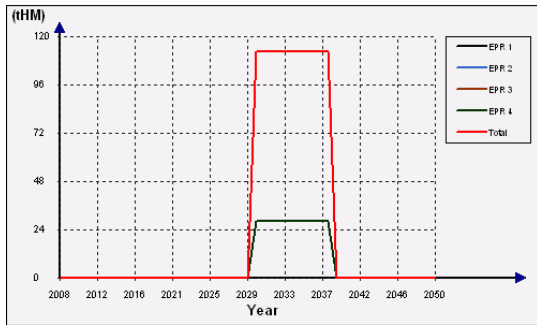


Figura 30: U naturale salvato dall'uso del MOX nel periodo 2030-2038, scenario ONE

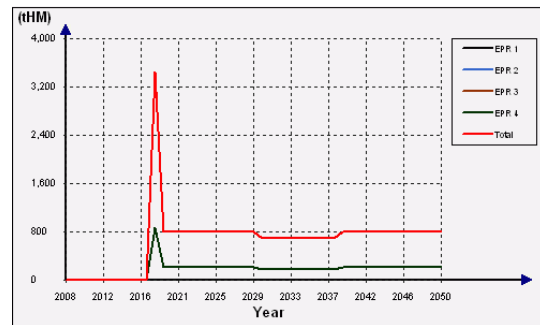


Figura 31: U naturale richiesto per lo scenario ONE, valori annuali

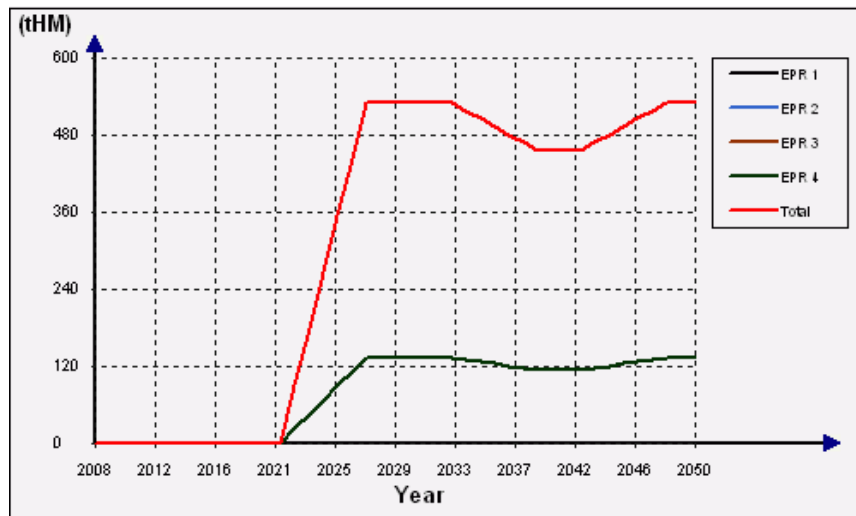


Figura 32: Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario ONE

## 4.2.2 Scenario TWO

Analogamente a quanto fatto per il caso ONE, anche per il secondo scenario sono stati simulati gli 8 EPRs (4 a partire dal in 2028 con uso del MOX come combustibile in secondo strato and 4 in 2025 senza l'uso del MOX) mantenendo costante il fattore di carico ad un valore pari all'85%. A partire poi dal 2038, sono stati introdotti i reattori veloci (ELSY-oriented) anch'essi con fattore di carico costante, pari all'80%. L'energia elettrica prodotta annualmente e' rappresentata in Figura 33 e rappresenta l'11.4% del totale dei bisogni energetici al 2050 come indicato in Figura 27.

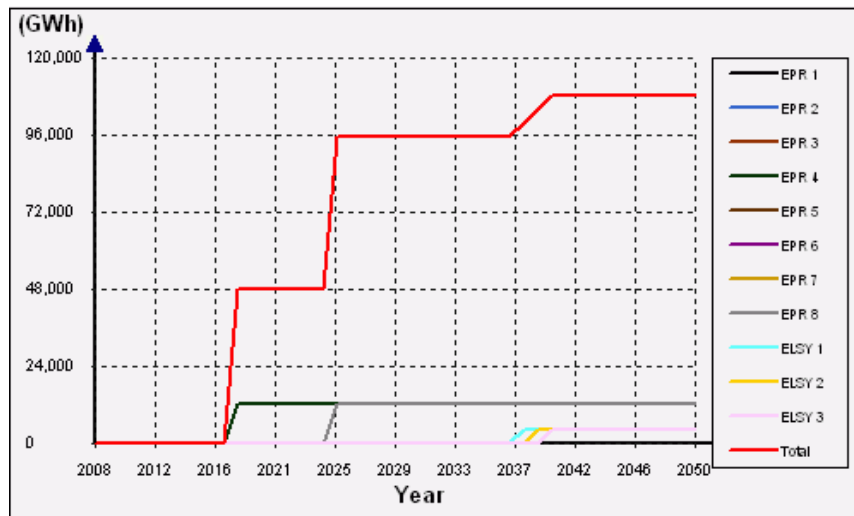


Figura 33: Elettricit  prodotta annualmente, scenario TWO

Particolarmente interessante pu  essere l'analisi delle risorse: in Figura 34 e' rappresentata la quantit  di U naturale richiesta annualmente per sostenere il ciclo e in Figura 35 l'U salvato dall'uso di MOX (sia in LWR che nei reattori veloci, questi ultimi utilizzando plutonio riprocessato permettono un migliore utilizzo delle risorse naturali).

Per quanto riguarda poi una stima dei rifiuti prodotti si faccia riferimento alla Figura 36 dove e' indicata la quantit  annuale disponibile al riprocessamento e alla Figura 37 dove e' riportata l'inventario di combustibile esausto in piscina in attesa del riprocessamento.

Un altro aspetto interessante e' la Figura 38 che mostra i flussi di massa fra le varie facility del ciclo del combustibile (cosi' come rappresentato in NFCSS). In questa Figura 38 si evince che il Pu prodotto dal ciclo al 2050 (a seguito di riprocessamento) non e' sufficiente a sostenere il ciclo (start-up dei reattori veloci) e quindi e' necessario che venga fornito per altre vie (es. acquisto di combustibile MOX da stati esteri). Questo evidenzia uno dei punti

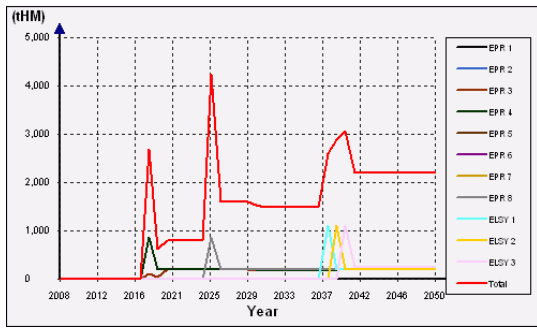


Figura 34: U naturale richiesto per lo scenario TWO, valori annuali

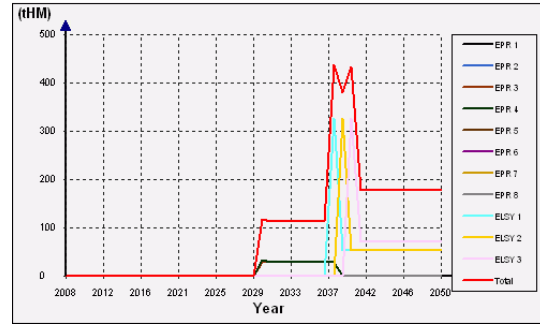


Figura 35: U naturale salvato dall'uso del MOX nel periodo 2030-2038, scenario TWO

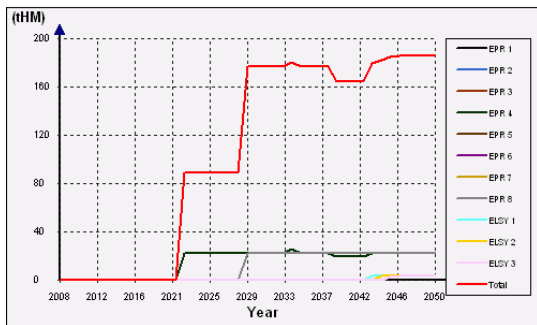


Figura 36: Spent Fuel annualmente disponibile al riprocessamento, scenario TWO

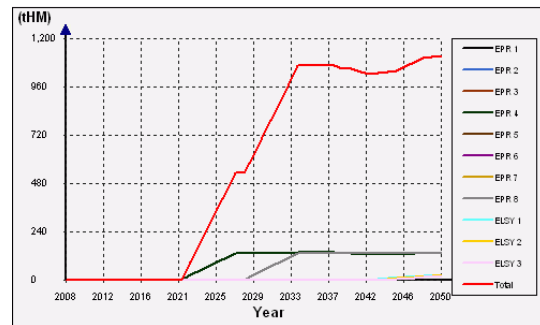


Figura 37: Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario TWO

già citati preliminarmente: lo sviluppo dei veloci è condizionato alla disponibilità di Pu nel ciclo. Per risolvere ed analizzare problematiche come quella appena citata è dunque opportuno studiare scenari su una più vasta scala temporale (es. al 2100). Circa la disponibilità delle risorse nel ciclo (es. Pu) può essere interessante confrontare scenari in cui un singolo stato è trattato in isolamento o facente parte di una regione più vasta (es. Europa) con facility condivise.

Questo scenario può essere ulteriormente analizzato attraverso un codice di calcolo più flessibile (es. COSI6 [9]) per ovviare ad alcuni errori sistematici in cui si può incorrere usando il codice NFCSS. Infatti, come ricordato precedentemente, il codice non gestisce in maniera accurata scenari in cui reattori termici e reattori veloci siano eserciti contemporaneamente.

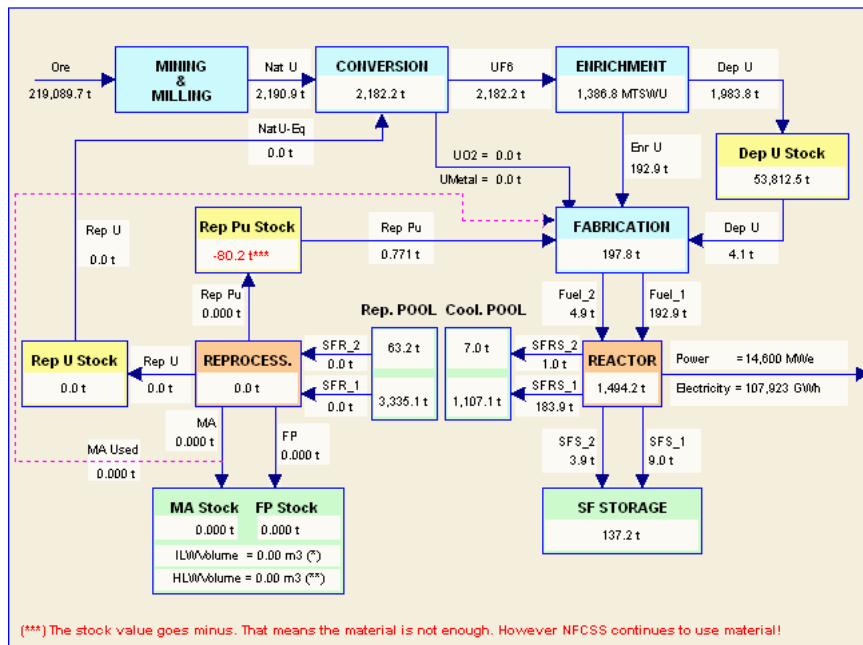


Figura 38: Bilancio di massa fra le facility del ciclo al 2050, scenario TWO

### 4.2.3 Scenario THREE

Analogamente ai casi precedenti anche lo scenario THREE e' stato implementato in NFCSS. Questo scenario prevede l'introduzione di 12 EPRs (in tre step successivi da 4 unità ciascuno) e 7 LFR (introdotti a partire dal 2038). L'elettricità prodotta annualmente e' riportata in Figura 39, ed e' pari a 172397 GWhe nel 2050, valore che corrisponde al 12.57 % del totale della richiesta elettrica, come indicato in Figura 27.

Analogamente l'U naturale richiesto annualmente e quello salvato dall'uso di MOX sono riportati rispettivamente in Figura 40 e Figura 41. Mentre l'inventario in piscina pronta per il riprocessamento e' riportata in Figura 42.

I flussi di massa fra le varie facility del ciclo del combustibile al 2050 sono rappresentati in Figura 43. Il Pu presente nel ciclo non e' sufficiente a sostenere lo scenario così come ipotizzato. Un processo di ottimizzazione, dunque, dovrà essere fatto anche per questo scenario.

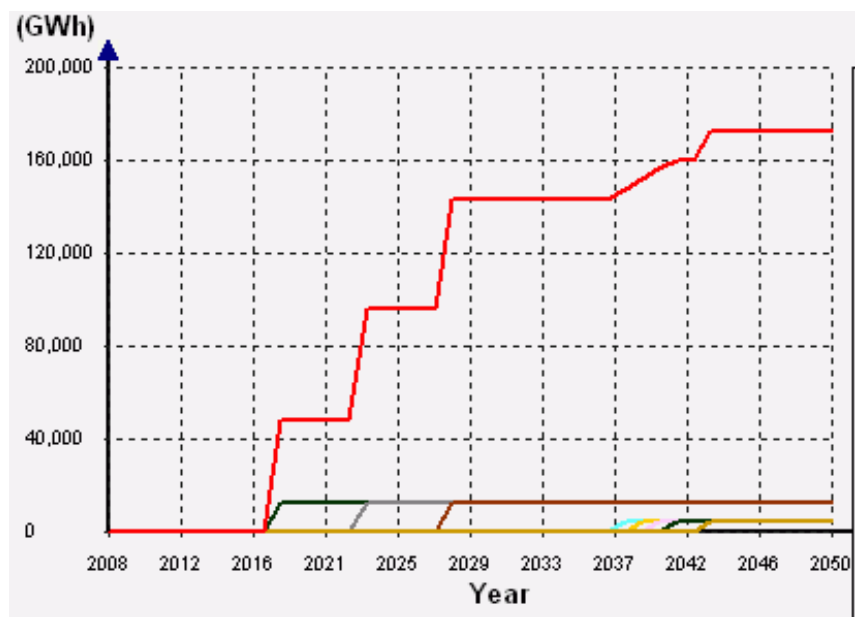


Figura 39: Elettricità prodotta annualmente, scenario THREE

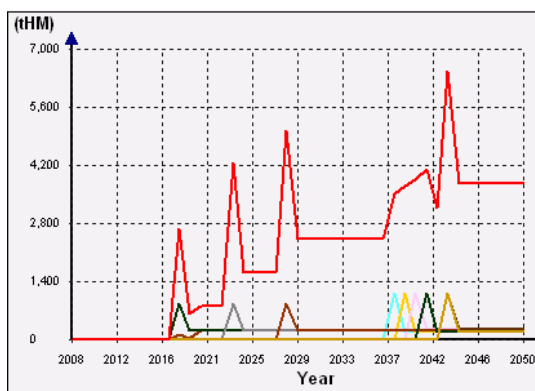


Figura 40: U naturale richiesto per lo scenario THREE, valori annuali

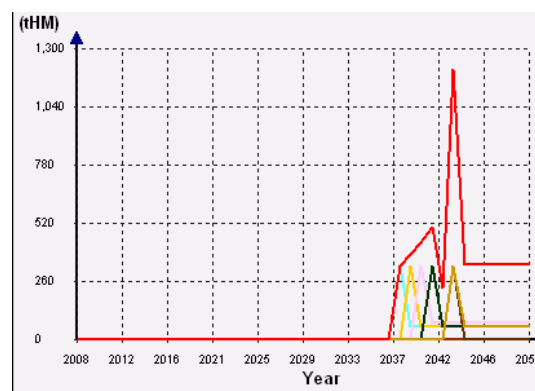


Figura 41: U naturale salvato dall'uso del MOX, scenario THREE

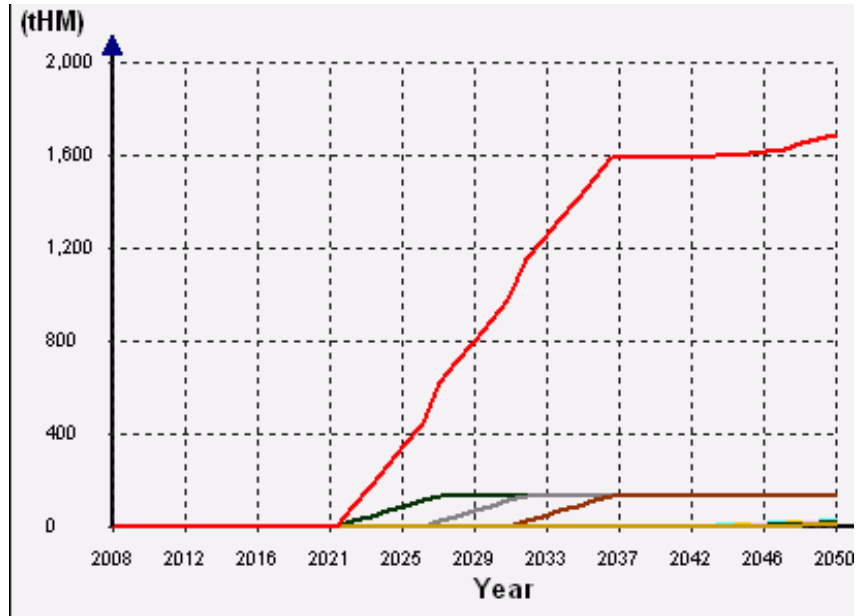


Figura 42: Spent Fuel in piscina in attesa di riprocessamento, scenario THREE

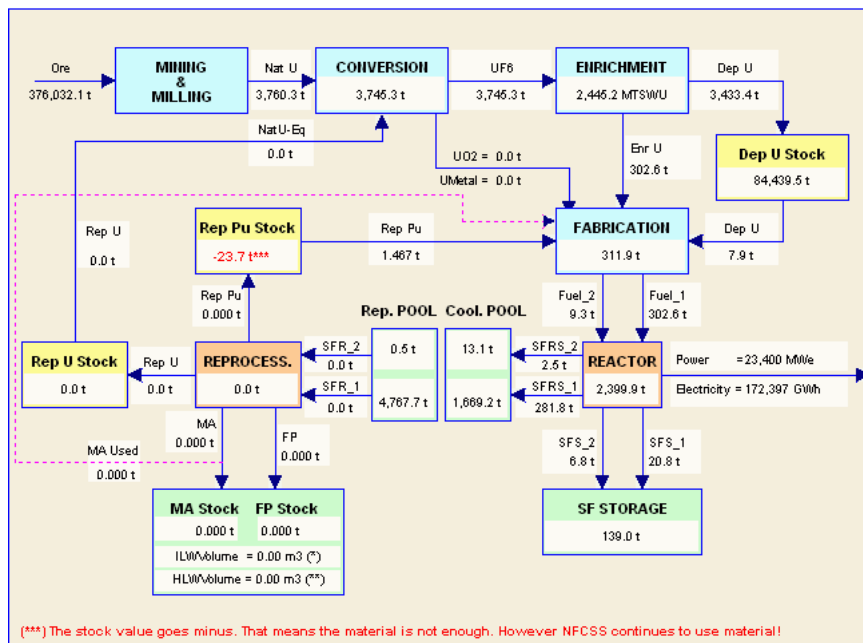


Figura 43: Bilancio di massa fra le facility del ciclo al 2050, scenario THREE

---

## 5 Conclusioni

Il presente lavoro va ad aggiungersi al rapporto CIRTEN - CERSE 2008 (RL 1051- 2008) [5] in materia di analisi di scenari energetici.

La metodologia adottata per le analisi di scenario, descritta precedentemente in [5], e' stata richiamata brevemente e applicata allo studio preliminare del caso italiano.

In particolar modo, sono stati evidenziati alcuni punti critici riguardanti la scelta delle ipotesi di partenza dello scenario. Fra le varie criticità e' stata evidenziata la necessità di scegliere una domanda energetica futura da coprire con il nucleare che sia la più ragionevole possibile. Per periodi temporali limitati, 2008-2050, i dati forniti dall'IAEA, in accordo con i dati della NEA possono essere utilizzati come riferimento. Al contrario, per periodi più lunghi (fino al 2100), l'estrapolazione di questi dati porterebbe ad approssimazioni troppo elevate e quindi e' necessario fare riferimento ai dati forniti da enti internazionali come l'IPCC e l'IIASA. Questi dati sono stati presentati nel dettaglio andando ad evidenziare alcuni andamenti discutibili per il nucleare mostrando che una scelta accurata dei dati al contorno per le analisi di fuel cycle e' fattore fondamentale.

In questo lavoro è stato presentato il caso italiano, attraverso una valutazione preliminare, come esempio di caso limite per le analisi di scenario (Italia come stato in rinascita e quindi con diverse condizioni di partenza rispetto agli altri stati europei). Ipotesi aggiuntive per far fronte a questo caso limite sono state indicate e la loro applicazione a tre scenari proposti analizzata.

In aggiunta lo scenario storico italiano e' stato simulato attraverso il codice NFCSS dell'IAEA sulla base dei dati relativi ai singoli reattori e disponibili nel database PRIS dell'IAEA stessa fornendo risultati accettabili per quanto riguarda i rifiuti prodotti sul territorio italiano.

Come esempio di studio piu' dettagliato e' stato riportato il lavoro presentato da ENEA [11] circa lo scenario mondiale ed Europeo.

Altre criticità circa lo strumento di calcolo adottato sono state individuate (scenari con reattori termici e veloci in esercizio contemporaneamente non sono adeguatamente simulati) e il passaggio a codici più flessibili (es. COSI6 del CEA) e' fondamentale.

L'attività e' tutt'ora in corso all'interno di un progetto di tesi di dottorato sviluppato in collaborazione fra l'Università di Pisa (Italia) e il Karlsruhe Institut for Technology (Germania).

---

## Riferimenti bibliografici

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. *Emissions Scenarios*. Technical report, IPCC, 2000.
- [2] <http://www.terna.it>.
- [3] <http://www.iaea.org/programmes/a2/>.
- [4] IAEA. Energy, electricity and nuclear power estimates for the period up to 2030. Technical report, IAEA, 2008.
- [5] G. Forasassi B. Vezzoni. *Analisi di scenari energetici: Introduzione di reattori nucleari innovativi*. Technical report, 2008.
- [6] EC. Strategic energy technology plan. Technical report, EC, 2007.
- [7] EC. Sustainable nuclear energy technical platform: Strategic research agenda. Technical report, EC, 2009.
- [8] *Nuclear Fuel Cycle Simulation System (NFCSS) User Manual*, 2008.
- [9] L. Boucher et al. *Cosi: the complete renewal of the simulation software for the fuel cycle analysis*. In *ICONE-14*, 2006.
- [10] IIASA. Global energy perspectives. Technical report, IIASA, 1998.
- [11] F. Bianchi et al. Regional and world level scenarios for sodium fast reactor deployment. In *NENE2009*, 2009.
- [12] IAEA. International project on innovative nuclear reactors and fuel cycles. Technical report, IAEA, 2010.
- [13] NEA. Nuclear energy data. Technical report, OECD, 2008.
- [14] NERAC-GIFIV. A technology roadmap for generation iv nuclear energy systems. Technical Report GIF-002-00, U.S. DOE, 2002.
- [15] T.Botella et al. *European Citizens Opinions towards Radioactive Waste: an updated review*. EU, April 2006.
- [16] IAEA-UNDESA-IEA-Eurostat-EEA. 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] NEA. Uranium 2007: Resources, production and demand. Technical report, OECD, 2007.
- [19] V. Tsibulskiy et al. Desae (dynamic energy system- atomic energy) integrated computer model for performing global analysis in inpro assessment studies. In *ICONE-14*, 2006.
- [20] Comunicazione personale.

---

## A Appendice: Dati storici Italia

I dati adottati come riferimento per i reattori installati in Italia nel periodo 1963-1989 sono riportati nelle seguenti tabelle: rispettivamente Caorso Tabella 5, Trino Tabella 6, Garigliano Tabella 7 e Latina Tabella 8. I dati derivano dal database dell'IAEA.

| YEAR | ENERGY | CAPACITY | LOAD FACTOR (%) |        | ANNUAL TIME ONLINE |
|------|--------|----------|-----------------|--------|--------------------|
|      | GWhe   |          | MWe             | Annual | Cumulative         |
| 1978 | 459    | 652      | 13.15           |        | 1878               |
| 1979 | 1003   | 548      | 20.89           |        | 2708               |
| 1980 | 1220   | 548      | 25.34           |        | 1976               |
| 1981 | 1659.3 | 840      | 49.86           |        | 2450               |
| 1982 | 5732.5 | 840      | 77.9            | 77.9   | 7906               |
| 1983 | 4312   | 873      | 56.38           | 66.94  | 5858               |
| 1984 | 4065   | 860      | 53.81           | 62.54  | 5769               |
| 1985 | 3975   | 860      | 52.76           | 60.09  | 6073               |
| 1986 | 5300   | 860      | 70.35           | 62.15  | 6648               |
| 1987 | 0      | 860      |                 | 51.78  |                    |
| 1988 | 0      | 860      |                 | 44.36  |                    |
| 1989 | 0      | 860      |                 | 38.81  |                    |
| 1990 | 0      | 860      |                 | 34.82  |                    |

Tabella 5: Dati storici Italia: CAORSO [3]

Per quanto riguarda invece il mix energetico nello stesso Paese si riportano in Tabella 9 i dati storici dal sito di Terna

| YEAR | ENERGY | CAPACITY | LOAD FACTOR (%) |        | ANNUAL TIME ONLINE |
|------|--------|----------|-----------------|--------|--------------------|
|      | GWe    |          | MWe             | Annual | Cumulative         |
| 1964 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1965 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1966 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1967 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1968 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1969 | 0      | 260      |                 |        |                    |
| 1970 | 1243   | 256      | 55.43           | 9.12   | 5723               |
| 1971 | 1355.4 | 256      | 60.44           | 16.36  | 6000               |
| 1972 | 1985.4 | 256      | 88.29           | 25.29  | 8475               |
| 1973 | 1357   | 247      | 62.72           | 29.28  | 6324               |
| 1974 | 1560.1 | 247      | 72.1            | 33.4   | 7079               |
| 1975 | 2207.4 | 260      | 96.92           | 39.25  | 8706               |
| 1976 | 1514.4 | 247      | 69.8            | 41.72  | 6591               |
| 1977 | 1826   | 260      | 80.17           | 44.72  | 6952               |
| 1978 | 2094.9 | 260      | 91.98           | 48.14  | 8401               |
| 1979 | 705    | 260      | 30.95           | 46.98  | 3175               |
| 1980 | 0      | 260      |                 | 44     |                    |
| 1981 | 0      | 260      |                 | 41.38  |                    |
| 1982 | 0      | 260      |                 | 39.06  |                    |
| 1983 | 0      | 260      |                 | 36.98  |                    |
| 1984 | 1631   | 260      | 71.41           | 38.73  | 6415               |
| 1985 | 1295.3 | 260      | 56.87           | 39.6   | 5752               |
| 1986 | 2016.2 | 260      | 88.52           | 41.84  | 8417               |
| 1987 | 159    | 260      | 6.98            | 40.31  | 1903               |
| 1988 | 0      | 260      |                 | 38.62  |                    |
| 1989 | 0      | 260      |                 | 37.06  |                    |
| 1990 | 0      | 260      |                 | 35.62  |                    |

Tabella 6: Dati storici Italia: TRINO [3]

| YEAR | ENERGY | CAPACITY | LOAD FACTOR (%) |            | ANNUAL TIME ONLINE |
|------|--------|----------|-----------------|------------|--------------------|
|      | GWe    | MWe      | Annual          | Cumulative | hours              |
| 1964 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1965 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1966 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1967 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1968 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1969 | 0      | 150      |                 |            |                    |
| 1970 | 0      | 160      |                 |            |                    |
| 1971 | 1163.7 | 160      | 83.03           | 12.41      | 7936               |
| 1972 | 436    | 160      | 31.02           | 14.84      | 3210               |
| 1973 | 970    | 150      | 73.82           | 21.24      | 7197               |
| 1974 | 719.6  | 150      | 54.76           | 24.53      | 5818               |
| 1975 | 470.7  | 150      | 35.82           | 25.54      | 4154               |
| 1976 | 1144.9 | 151      | 86.32           | 30.56      | 8063               |
| 1977 | 448.3  | 151      | 33.89           | 30.81      | 4003               |
| 1978 | 456.5  | 151      | 34.51           | 31.07      | 3402               |
| 1979 | 0      | 151      |                 | 29.02      |                    |
| 1980 | 0      | 151      |                 | 27.22      |                    |
| 1981 | 0      | 151      |                 | 25.63      |                    |
| 1982 | 0      | 150      |                 | 24.23      |                    |

Tabella 7: Dati storici Italia: GARIGLIANO [3]

| YEAR | ENERGY | CAPACITY | LOAD FACTOR (%) |            | ANNUAL TIME ONLINE |
|------|--------|----------|-----------------|------------|--------------------|
|      | GWhe   | MWe      | Annual          | Cumulative | hours              |
| 1963 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1964 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1965 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1966 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1967 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1968 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1969 | 0      | 153      |                 |            |                    |
| 1970 | 1191   | 155      | 87.72           | 12.66      |                    |
| 1971 | 845.3  | 160      | 60.31           | 18.84      | 6397               |
| 1972 | 1204.1 | 160      | 85.67           | 26.53      | 7751               |
| 1973 | 654.6  | 150      | 49.82           | 28.79      | 5401               |
| 1974 | 953.8  | 153      | 71.16           | 32.61      | 7455               |
| 1975 | 948.3  | 153      | 70.75           | 35.77      | 7362               |
| 1976 | 946.6  | 153      | 70.43           | 38.42      | 7980               |
| 1977 | 1076.4 | 153      | 80.31           | 41.39      | 7653               |
| 1978 | 1184.9 | 153      | 88.41           | 44.51      | 8351               |
| 1979 | 789    | 153      | 58.87           | 45.4       | 5284               |
| 1980 | 894    | 153      | 66.52           | 46.64      | 5981               |
| 1981 | 895.4  | 153      | 66.81           | 47.75      | 6182               |
| 1982 | 872.2  | 153      | 65.08           | 48.66      | 5997               |
| 1983 | 1274   | 153      | 95.05           | 50.97      | 8641               |
| 1984 | 933    | 153      | 69.42           | 51.84      | 6160               |
| 1985 | 1186.6 | 153      | 88.53           | 53.5       | 8331               |
| 1986 | 1131   | 153      | 84.39           | 54.84      | 7663               |
| 1987 | 0      | 153      |                 | 52.57      |                    |

Tabella 8: Dati storici Italia: LATINA [3]

---

| Anno | Idro  | Termoel. | Geot. | Nucl. | Tot    |
|------|-------|----------|-------|-------|--------|
| 1963 | 46107 | 22487    | 2427  | 323   | 71344  |
| 1964 | 39328 | 32482    | 2527  | 2402  | 76739  |
| 1965 | 43008 | 33874    | 2576  | 3510  | 82968  |
| 1966 | 44321 | 39176    | 2633  | 3863  | 89993  |
| 1967 | 42949 | 48118    | 2610  | 3152  | 96829  |
| 1968 | 43477 | 55264    | 2694  | 2576  | 104011 |
| 1969 | 42001 | 64002    | 2765  | 1679  | 110447 |
| 1970 | 41300 | 70222    | 2725  | 3176  | 117423 |
| 1971 | 40019 | 78812    | 2664  | 3365  | 124860 |
| 1972 | 42715 | 86338    | 2582  | 3626  | 135261 |
| 1973 | 39125 | 100771   | 2480  | 3142  | 145518 |
| 1974 | 39346 | 103647   | 2502  | 3410  | 148905 |
| 1975 | 42576 | 98474    | 2483  | 3800  | 147333 |
| 1976 | 40943 | 116277   | 2523  | 3807  | 163550 |
| 1977 | 52726 | 107933   | 2501  | 3385  | 166545 |
| 1978 | 47413 | 120706   | 2494  | 4428  | 175041 |
| 1979 | 48212 | 127924   | 2500  | 2628  | 181264 |
| 1980 | 47511 | 133350   | 2672  | 2208  | 185741 |
| 1981 | 45736 | 130549   | 2664  | 2707  | 181656 |
| 1982 | 44080 | 130823   | 2737  | 6804  | 184444 |
| 1983 | 44216 | 130167   | 2714  | 5783  | 182880 |
| 1984 | 45434 | 127508   | 2840  | 6887  | 182669 |
| 1985 | 44595 | 131440   | 2681  | 7024  | 185740 |
| 1986 | 44531 | 136281   | 2760  | 8758  | 192330 |
| 1987 | 42585 | 155627   | 2986  | 174   | 201372 |
| 1988 | 43547 | 156932   | 3082  | 0     | 203561 |
| 1989 | 37484 | 170111   | 3155  | 0     | 210750 |
| 1990 | 35079 | 178590   | 3222  | 0     | 216891 |

Tabella 9: Dati storici Italia: mix energetico [2]

# **B Appendice: Studio ENEA**

## **REGIONAL AND WORLD LEVEL SCENARIOS FOR SODIUM FAST REACTOR DEPLOYMENT**

**F. Bianchi, R. Calabrese, G. Glinatsis, A. Lantieri, S. Monti, F. Vettrai**  
NEA CRE E. Clementel  
Via Martiri Di Monte Sole 4, 40129 Bologna, Italy  
fosco.bianchi@enea.it, rolando.calabrese@enea.it, georgios.glinatsis@enea.it,  
antonino.lantieri@enea.it, stefano.monti@enea.it, fortunato.vettrai@enea.it

### **ABSTRACT**

The revival of interest towards fast neutron reactors is due to their capability of producing more fissile material than they consume and reducing the burden on the disposal of high-level waste containing very-long life nuclides. Several studies on the impact of transition scenarios have been launched by international and national organizations. They show that the relevance of transitioning to fast reactors depends on the expected future role of nuclear energy and on the development of advanced nuclear technologies.

The purpose of the present study is to investigate the maximum deployable capacity of fast reactors at European and world levels mainly from the viewpoint of natural uranium and plutonium availability and energy demand projections. The calculations were performed with the DESAE code.

The results show that the maximum deployable capacity of fast reactors at European level is not limited by the plutonium and uranium availability with a reprocessing capacity of 3000 t/yr, whereas in the global scenario it strongly depends on the availability of uranium resources and plutonium stockpile.

### **1 INTRODUCTION**

With an almost constant or slowly increasing of nuclear energy demand, the LWR technology can cope with the electric energy request at present rate of natural uranium consumption for some centuries, unless other criteria are taken into account, such as for example plutonium and/or waste minimisation [1]. Instead with a significant expansion of nuclear power due to the nuclear renaissance and/or policy in several countries, the security of natural uranium resources may be not assured after 2100 [1, 2]. The use of fast reactors becomes necessary, because they offer better performance than thermal reactors in terms of their capability in recycling and producing more fissile than they consume. Furthermore fast reactors allow to “burn” minor actinides, so reducing the waste amount and radiotoxicity, as well as the heat load on the final repository, and therefore the burden on the disposal of high-level waste containing very-long life nuclides.

Several studies have been launched by international organizations (IAEA, NEA, EU) and national institutes on the impact of alternative scenarios to LWR once-through fuel cycle. The outcomes of these studies show that the relevance of transitioning to fast reactors depends on the expected future role of nuclear energy and on the development of advanced nuclear technologies, which in their turn depend on R&D programmes undertaken within national and international framework. The choice of a scenario at country, region or world level must be done with a holistic approach that takes into account different parameters: efficiency of

natural resource utilization, security of supply, radioactive waste management, infrastructure requirements and capabilities and duration of transition period [3, 4, 5, 6, 7].

The scenarios assessed in the present study are aimed at investigating the potential of innovative sodium-cooled fast reactors in satisfying the conditions for a sustainable development at European and world level during the present and next century. They foresee the transition from the current LWRs to ALWRs in a first phase and to sodium fast reactors in a second phase. The calculations have been performed with the DESAE code, developed in the frame of IAEA-INPRO project by Kurchatov Institute [8].

The paper deals with the results of the reference scenarios assessment and the sensitivity analysis performed in order to evaluate the impact of some parameters (SFR share, deployment timing, reprocessing capacity, SNF cooling time and breeding ratio).

## 2 REFERENCE TRANSITION SCENARIOS

The assessed scenarios at regional and global level foresee the transition from the current LWRs to ALWRs in a first phase and to sodium fast reactors in a second phase.

### 2.1 Regional and global scenario description

The regional scenario refers to a limited number of EU countries<sup>1</sup> with a fleet of 120 nuclear power plants and a total installed capacity of about 120 GWe. Two reference energy demand trends, shown in Table 1, have been hypothesized referring to the electric energy capacity projections developed by international organisations (NEA and IAEA) for the low scenarios [9,10]:

- Case **R-1** - constant electric energy demand. It refers to the “rationale” of NEA scenario, where the energy demand is almost constant up to 2050. As the NEA forecast is limited up to 2050, we have hypothesized to extend the projection “rationale” after 2050, i.e. we have considered the energy demand in the European countries still constant and the increase of energy capacity localized in other regions;
- Case **R-2** - increasing electric energy demand. It assumes the “rationale” of the IAEA INPRO scenario that hypothesizes an increase of the total energy consumption after 2030 with a nuclear share equal to its current level.

Also the global scenario (Case **G-1**) refers to the “rationale” of IAEA-INPRO low scenario and the corresponding projections are shown in the same Table 1.

Table 1 : Regional and global scenarios: nuclear capacity projections (GWe)

| Case       | 1980 | 2000 | 2010 | 2030 | 2050 | 2100 | 2150 |
|------------|------|------|------|------|------|------|------|
| <b>R-1</b> | 0    | 120  | 120  | 120  | 120  | 120  | 120  |
| <b>R-2</b> | 0    | 120  | 120  | 120  | 180  | 270  | 270  |
| <b>G-1</b> | 0    | 372  | 372  | 500  | 1000 | 2500 | 2500 |

To satisfy the energy demand the following assumptions for all scenarios have been made:

<sup>1</sup> Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Finland, France, Germany, Hungary, Spain, Sweden and Switzerland.

- a) the deployment of current LWRs starts in 1980 with a pace of 6 GWe/yr at regional level or 18.6 GWe/yr at global level. At the end of their lifetime they are replaced by ALWRs up to 2040;
- b) ALWRs and MOX-fuelled SFRs are deployed from 2040 to 2100 according to the energy demand and LWRs replacement;
- c) Only SFRs are deployed after 2100.

## 2.2 Hypotheses and assumptions

The following hypotheses and assumptions have been considered:

- The scenario covers about two centuries; the reference period is: 2000 – 2150;
- Both for regional and global scenarios the countries are considered as an indistinct whole in which all the resources (natural uranium, plutonium, spent fuel) and fuel cycle facilities (fabrication, enrichment and reprocessing) are shared among them;
- In the reference regional scenarios 1/3 of the total electricity demand will be warranted by SFRs deployment [11];
- Average LWR has been defined so that to be representative of current nuclear world fleet, whose 91% of the total installed capacity is produced by light water reactors (66% PWRs and 25% BWRs);
- Plutonium recycling in LWRs and ALWRs has been neglected, as nowadays the fraction of reactors fuelled with MOX is equal to 5%;
- UOX fuel discharged from LWRs/ALWRs is sent to the interim storage<sup>2</sup> and then reprocessed. Plutonium and depleted uranium coming from reprocessing plants are used for fabrication of SFR fuels;
- All the minor actinides produced by the reactor fleet are not recycled in SFRs and are directly sent to disposal together with fission products;
- According to the last Red Book [12], the currently known world uranium resources (identified<sup>3</sup> + undiscovered), equal to about 15.969 million tonnes<sup>4</sup>, has been considered as “limit” for the uranium availability at regional and global level;
- Current reprocessing capability for LWR fuel has been assumed equal to 2600 t/yr at European level and 3800 t/yr at world level [13];
- Tail assay for <sup>235</sup>U enrichment has been assumed equal to 0.2%.

## 2.3 Nuclear systems description

Two types of LWRs have been considered in this study: pressurized LWRs conventionally representing all the regional and world fleet and pressurized ALWRs, characterized by a high burn-up and a high thermodynamic cycle efficiency. The values of the main reactor parameters are shown in Table 2.

The reference sodium-cooled reactor (SFR-R) is slightly breeder. Its BR is close to one. The values of its main parameters are reported in Table 2. In the sensitivity analyses an advanced sodium-cooled reactor (SFR-A) with a high breeding ratio has been also considered. Its main parameters are shown in the same Table 2.

---

<sup>2</sup> the SNF cooling times are reported in Table 2

<sup>3</sup> the total identified uranium resources (reasonable assured and inferred) amount to about 4456000 t in the < USD 80/kgU category and 5469000 t in the < USD 130/kgU category, whereas the undiscovered resources are more than 10500000 t; consequently the value considered as limit represents the resources with the highest extraction cost.

<sup>4</sup> neglecting the resources coming from phosphates and seawater

Table 2 : Basic reactor parameters

| Parameter   | LWR | ALWR | SFR-R | SFR-A |
|---|-----|------|-------|-------|
| Reactor Unit Capacity (GWe)                           | 1   | 1.5  | 0.9   | 1.8   |
| Heavy nuclei load (t)                                 | 80  | 135  | 64    | 120   |
| U235 enrichment (%)                                   | 4   | 4.9  | 0.2   | 0.2   |
| Burn-up (GWd/t)                                       | 45  | 60   | 65    | 140   |
| Natural uranium consumption (tU/GWe*yr)               | 180 | 150  | -     | -     |
| Excess fissile Pu production (Kg/GWe*yr) <sup>5</sup> | -   | -    | 40    | 295   |
| SNF cooling time                                      | 5   | 3    | 3     | 3     |
| Plant lifetime (yrs)                                  | 50  | 60   | 60    | 60    |

### 3 DESAE CODE

The scenario analyses were performed with DESAE code developed by the Kurchatov Institute in support of the IAEA-INPRO project activities [8].

The code allows the assessment of the resources, both financial and material, needed for a fleet of reactors to meet a specified nuclear energy supply projections at country, regional and global level.

The code performs material flow analysis based on a user-defined deployment scenario of reactors and fuel cycle facilities. It allows to model both open and closed fuel cycles (U-Pu, U-Th, Pu-Th and other combinations) including recycling of U and Th. The code is not able to perform burn-up or core management calculations and it bases its results on a database of fresh, equilibrium and spent fuel compositions, provided by the user for the different types of reactors. The fuel composition is followed for 17 isotopes, i.e. <sup>232</sup>Th, <sup>232</sup>U, <sup>233</sup>U, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>236</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>238</sup>Pu, <sup>239</sup>Pu, <sup>240</sup>Pu, <sup>241</sup>Pu, <sup>242</sup>Pu, <sup>237</sup>Np, <sup>242m</sup>Am, <sup>244</sup>Cm, <sup>129</sup>I, <sup>99</sup>Tc, with one additional group for the other fission products. The code also calculates integral and differential consumption of different materials, e.g. Fe, Cu, Al, Zr. For fast reactors the core and blankets (axial and radial) are considered separately to take into account their isotopic compositions and cooling time before recycling.

The code allows to model seven reactor types at the same time, each one having its own fuel exchange path to be defined by the user. The fuel cycle may be represented with four fuel cycle facilities, without tracing losses in these facilities. The quantity of fission products and decay heat in spent fuel is calculated, but repository needs are currently only defined by the volume of materials to be stored.

The economic analysis with DESAE is limited to the evaluation of the required investment, net present value of investment and current cost of electricity, based on the capital costs of reactors and fuel cycle facilities, the operation and maintenance costs and the calculated fuel cycle costs.

### 4 RESULTS

The analysis has been aimed at investigating the maximum share of SFRs consistent with a sustainable development and the reprocessing plant capacity. To this end a comparison with once-through fuel cycle results has been performed and some parameters (SFR share,

<sup>5</sup> It is an output of the code and represents the difference between the production and consumption of plutonium related to an year operation and a power of one GWe.

deployment timing, reprocessing capacity, SNF cooling time and breeding ratio) have been modified in order to investigate their impact on the results.

#### 4.1 Regional scenario results

In the open fuel cycle the cumulative uranium consumption at year 2150 is equal to 3.07 and 5.22 million tonnes in the R-1 and R-2 scenario, respectively. In both cases it is lower than the total identified uranium resources<sup>6</sup> [12]. The total spent fuel mass to be stored in the deep geological repository amounts to about 0.37 million tonnes for R-1 and 0.63 million tonnes for R-2 scenario. As shown in Table 3, the SFR-R deployment allows to reduce the pressure on uranium resources. In fact, at increasing of the SFR-R share, the consumption of natural uranium decreases; in particular for both scenarios it is smaller than value of the total identified uranium resources related the <USD 80/kgU category. Instead the R-2 scenario is not sustainable from the plutonium availability point of view, as the amount of plutonium necessary for SFR-R deployment is insufficient. With an increase of the reprocessing capacity from 2600 to 3000 t/yr, the plutonium amount is always positive, as shown in Table 3.

Table 3 : Regional scenarios - Uranium and fissile plutonium balance

| Deployment date | SFR-R share (%) | U <sub>nat</sub> cumulative consumption at 2150 (t) |          | Minimum plutonium amount <sup>7</sup> (t) |            |
|-----------------|-----------------|---|----------|---|------------|
|                 |                 | R-1   | R-2      | R-1                                       | R-2        |
| 2040            | 33              | 1.59E+06  | 2.37E+06 | 427                                       | 496 (2040) |
|                 | 40              |   | 2.28E+06 |   | 496 (2040) |
|                 | 66              |   | 1.95E+06 |   | 359 (2055) |
|                 | 80              |   | 1.78E+06 |   | 278 (2056) |
|                 | 95              |   | 1.59E+06 |   | 186 (2056) |
| 2060            | 33              |   | 2.64E+06 |   | 291 (2117) |
|                 | 95              |   | 2.38E+06 |   | 242 (2114) |

Figures 1 and 2 show the annual installed electric capacity in the reference R-1 and R-2 scenarios, in which the SFR-R share is equal to 33% from 2040 and only SFRs are deployed after 2100. Both reference scenarios are sustainable having always available the necessary amount of plutonium for the SFR-R core fuel loading: the former with the current reprocessing capacity, the latter with a capacity of 3000 t/yr. Furthermore the R-1 and R-2 scenarios are still sustainable at increasing the SFR-R share, (see Table 3).

A 20 years deployment delay provokes a lack of plutonium amount for the fabrication of SFRs fuel to cope with the steep share at 2100, under the current reprocessing capability. It is sufficient to increase the reprocessing capacity by 400 t/yr to have again a positive excess of plutonium amount, (see Table 3).

Also a scenario characterized by a ALWRs fraction different from zero in the period 2100-2150<sup>8</sup>, (see Figure 4), has an excess of plutonium production still positive (10 t) with the current reprocessing plant capacity and a cumulative uranium consumption of 3.05 million tonnes. The SFR-A deployment instead requires to increase the reprocessing capacity from 2600 t/yr to 3800 t/yr: the excess of fissile plutonium moves from -4786.31 t to 302 t.

<sup>6</sup> In particular in the R-1 scenario the uranium consumption is lower than the amount of the total identified uranium resources related the <USD 80/kgU category

<sup>7</sup> The values refer to a reprocessing capacity of 3000 t/yr; in brackets the year when the minimum value is attained

<sup>8</sup> In that period SFR-R plants replace 40% of ALWRs

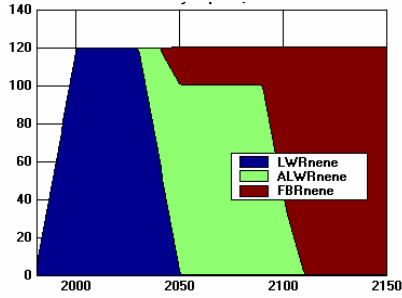


Figure 1: R-1 Annual installed capacity (GWe) for a 33% SFR-R share up to 2100

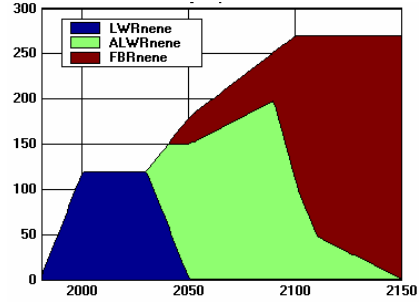


Figure 2: R-2 Annual installed capacity (GWe) for a 33% SFR-R share up to 2100

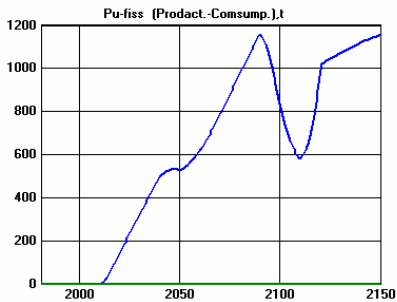


Figure 3: R-2: Production-consumption of fissile Pu for a 33% SFR-R share up to 2100

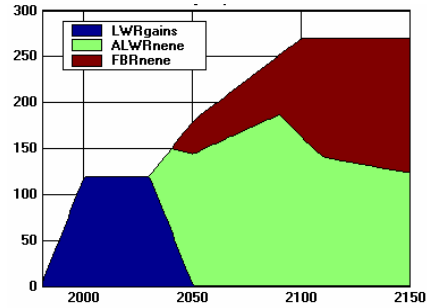


Figure 4: R-2 Annual installed capacity (GWe) for a 40% SFR-R share up to 2150

## 4.2 Global scenario

With the current world reprocessing plant capacity of 3800 t/yr, the adopted G-1 scenario is not sustainable due to the plutonium shortage, (see Table 4). Also the cumulative uranium consumption can be beyond the currently known world uranium resources depending on SFR share.

With a SFR-R share of 40% the uranium consumption is nearly equal to the known world uranium resources and the scenario becomes sustainable only if the reprocessing capacity is increased by at least 7 times, Figure 5. Instead the SFR-A deployment requires higher reprocessing plant capacity (about 15 times the current one) and investment.

Assuming a reprocessing capacity that gives positive plutonium balance<sup>9</sup>, the consequences of a reduction in SNF cooling time are shown in Table 5, where the plutonium balance at year 2150 is reported for two assessed SFR options. The cooling time reduction has a strong impact on plutonium inventory and therefore it has to be carefully chosen for optimizing the scenario from the economic point of view.

Table 4 : G-1 scenario - uranium and fissile plutonium balance at year 2150

| SFR-R share (%) | $U_{nat}$ cumulative consumption (t) | Minimum plutonium amount (t) |
|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 5               | 20.53E+06                            | -5.27E+04                    |
| 33              | 17.02E+06                            | -6.53E+04                    |
| 95              | 7.23E+06                             | -10.44E+04                   |

<sup>9</sup> 25,000 t/yr for SFR-R and 55,000 t/yr for SFR-A

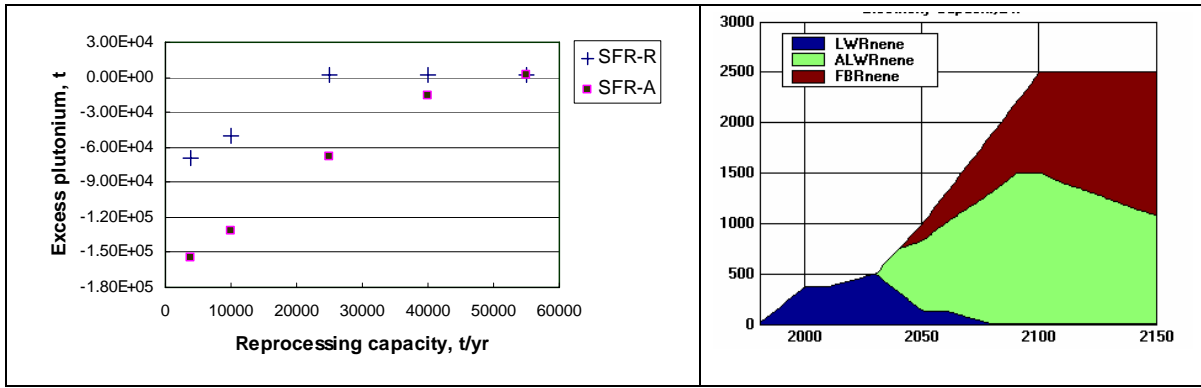


Figure 5 : Minimum fissile Plutonium excess vs reprocessing capacity

Figure 6 : G-1 Annual installed capacity (GWe): SFRs share = 40% up to 2150

Table 5 : Fissile plutonium balance at year 2150 (t)

| SNF Cooling time (yrs) | SFR-R    | SFR-A    |
|------------------------|----------|----------|
| 3                      | 0.53E+04 | 1.63E+04 |
| 2                      | 0.68E+04 | 1.97E+04 |

A change of the policy in the scenario G-1, Figure 6, which foresees a SFR-R share of 40% up to 2100 and a fraction of ALWRs different from zero<sup>10</sup> in the period 2100-2150, leads to a non-sustainability of the scenario, even if the plutonium amount is positive, as the cumulative uranium consumption is greater than the currently known world uranium resources.

A delay of 20 years in the SFR-R deployment leads to an increase of the  $U_{nat}$  consumption and plutonium amount, see Table 6.

Table 6 : G-1 modified - Uranium and fissile plutonium balance (t)

| Deployment date | $U_{nat}$ cumulative consumption (t) | Minimum plutonium amount (t) |
|-----------------|--------------------------------------|------------------------------|
| 2040            | 20.75E+06                            | 0.23E+04                     |
| 2060            | 24.05E+06                            | 0.42E+04                     |

## 5 CONCLUSIONS

The analysis performed, oriented to investigate the maximum deployable capacity of fast reactors at European and world levels mainly from the viewpoint of uranium and plutonium availability and energy demand projections, shows that:

- at regional level the R-1 and R-2 scenarios are sustainable: the former with the current reprocessing capacity, the latter requires an increase of the reprocessing capacity;
- at world level the reference scenario is sustainable only if the energy produced via SFRs is at least 40% of the total share and the construction of new reprocessing plants is planned;
- It is worth underlining that some benefits can be obtained by reducing the spent fuel cooling time.

<sup>10</sup> See note 8

## ACRONYMS

|       |  |
|-------|--|
| ALWR  | Advanced Light Water Reactor   |
| BR    | Breeding Ratio   |
| BWR   | Boiling Water Reactor  |
| DESAE | Dynamic Energy System –Atomic Energy                                 |
| EU    | European Union   |
| IAEA  | International Atomic Energy Agency                                   |
| INPRO | International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles |
| LWR   | Light Water Reactor  |
| NEA   | Nuclear Energy Agency of OECD  |
| PWR   | Pressurized Water Reactor  |
| SFR   | Sodium-cooled Fast Reactor (-R: Reference ; -A: Advanced)            |
| SNF   | Spent Nuclear Fuel   |
| Unat  | Natural uranium  |

## REFERENCES

- [1] O. Méplan, “The future of nuclear energy”, Conference on Energy: a challenge for 21st century physics, Les Houches, France, June 2-5, SFP/EPS, 2008.
- [2] V. Usanov, B. Raj, A. Vasile, "Progress and interim results of the INPRO joint study on assessment of INS based on closed nuclear fuel cycle with fast reactors ", Proc. Int. Conf. Global 2007: Advanced Nuclear Fuel Cycles and Systems, Boise, Idaho, September 6-13, American Nuclear Society, 2007.
- [3] NEA, “Nuclear Fuel Cycle Transition Scenario Studies – Status Report”, OECD Publications, Paris, 2009.
- [4] NEA, “Advanced Nuclear Fuel Cycles and Radioactive Waste Management – A Status Report”, OECD Publications, Paris, 2006.
- [5] K. Ono, A. Kato, A. Ohtaki, ”Global Scenario for fast Reactor Deployment”, 2<sup>nd</sup> Consultancy meeting of Collaborative Project on Gains, O-arai, Japan, October 29-31, JAEA, 2008.
- [6] A. Vasile, J.L. Fiorini, J. Cazalet, F.L. Linet, V. Moulin, D. Grenèche, “ Assessment of a French Scenario with the INPRO Methodology, Proc. of 2006 Int. Cong. On Advances in Nuclear Power Plants, Reno, NV USA, June 4-8, ANS, 2006, paper 6329.
- [7] S. Massara, P.Tetart, D. Lecarpentier, C. Garzenne, “Fast Breeder Reactor Scenarios of Nuclear Energy Evolution over the Word Scale”, Proc. 16<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Engineering, Nagoya, Japan, April 22-26, JSME, 2007, ICONE15-10270.
- [8] V. Tsibulskiy, S. Subbotin, M. Khroshev, F. Depisch, “DESAE (Dynamic Energy System- Atomic Energy) Integrated computer model for performing Global Analysis in INPRO Assessment Studies”, Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Nuclear Engineering, Miami, Florida, USA, July 17-20, ASME, 2006, ICONE14-89865.
- [9] NEA, “Nuclear Energy outlook 2008”, OECD Publications, Paris, 2008.
- [10] IAEA, “Global scenarios and regional trends of nuclear energy development in the 21<sup>th</sup> century”, IAEA publications, Vienna,. to be published.
- [11] EU, “SNE-TP - Strategic Research Agenda”, EU Publications, Brussels, 2008
- [12] NEA, “Uranium 2007: Resources, Production and Demand”, OECD Publications, Paris, 2008
- [13] NEA, “Strategic and policy issues raised by the transition from thermal to fast nuclear systems”, OECD Publications, Paris, 2009