UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

FACOLTÀ DI SCIENZE POLITICHE

Indirizzo Politico-Economico

TESI DI LAUREA

L'Energy Amplifier di Rubbia: gli studi per la produzione di un'energia nucleare pulita ed il loro impatto sul piano economico.

Relatore: Prof. Roberto Panizza

Correlatore: Dott. Stefano Buono

Candidata: Deborah Sessano

Aprile 2000

A.A. 1998-99

INDICE

Deborah Sessano

RINGRAZIAMENTI

Un ringraziamento particolare va al dott. Buono del CERN, che con immensa pazienza e con animo profondamente "fisico" mi ha seguito durante la stesura della tesi, fornendomi non solo materiale e chiarimenti, ma anche il sostegno e il buon umore che mi hanno permesso di arrivare alla fine.
Vorrei anche ringraziare l'ing. Principe del CERN, senza il quale non avrei mai saputo dell'importanza dell'*Energy Amplifier*.
Un altro ringraziamento va all'ing. Mansani e all'ing. Cinotti dell'Ansaldo che mi hanno fornito importanti indicazioni sia di carattere economico sull'*Energy Amplifier* che a livello di materiale utile per proseguire nella ricerca.

Un grazie tutto speciale è invece rivolto al prof. Panizza, senza il quale non avrei potuto realizzare il mio desiderio di studiare le relazioni che legano economia e ricerca (e di farlo in modo articolato e coerente in questa tesi), dandomi la possibilità di arrivare al CERN, che per me, ex-studentessa di Fisica, resta il sogno di sempre.

Infine, ma non ultimo in grado di importanza, vorrei ringraziare mia mamma per avermi sopportato in questo periodo e per avermi aiutato rileggendo le bozze della tesi. Ed i miei amici più stretti che mi hanno "accompagnato" in quest'avventura, senza lamentarsi troppo del mio particolare nervosismo di questi ultimi tempi e per avermi dato una mano a risolvere vari problemi in cui mi sono imbattuta sia col computer che col linguaggio scientifico.

A tutti, un grazie sincero.

Deborah Sessano

INTRODUZIONE

Nel corso della storia dell'umanità l'energia è stata una delle premesse necessarie affinché vi fosse un continuo sviluppo e miglioramento delle condizioni di vita, e tutt'oggi la disponibilità di energia è alla base della moderna società industriale. Accanto alla sua riconosciuta importanza, però, si pone una maggiore presa di coscienza dei suoi effetti sull'ambiente a livello mondiale. Per tale motivo sono attualmente in fase di studio nuovi mezzi di generazione dell'energia ed uno di essi è l'*Energy Amplifier,* nato dalla fertile mente del premio Nobel Carlo Rubbia e sviluppato dalla sua *équipe* del CERN di Ginevra.

Con il presente studio si intende valutare l'impatto economico e sociale che l'*Energy Amplifier* avrebbe nel mercato energetico, dimostrando che esso si rivela non solo una fonte competitiva, ma anche sicura e capace di risolvere buona parte dei problemi ambientali e di opinione pubblica comuni alle energie tradizionali.

Nella prima parte, composta da due capitoli, si analizzerà il mercato energetico, presentandone dapprima le diverse fonti ed in seguito la situazione a livello mondiale e regionale.

Dopo una breve descrizione del collegamento esistente tra energia, economia e fisica, si passerà ad esaminare nel dettaglio le coordinate economiche che caratterizzano le fonti di energia tradizionali. Si guarderà quindi alle fonti fossili in generale, presentando i comuni problemi di risorse scarse e di emissioni di gas-serra che avvicinano a noi la "data limite" per il loro utilizzo. Dopodiché si proseguirà con l'analisi, per ogni singolo combustibile fossile, del suo *share* nella generazione di elettricità mondiale, del suo prezzo attuale e atteso e dei suoi principali vantaggi e svantaggi. Lo stesso procedimento viene applicato alla presentazione dell'energia nucleare, sulla quale ci si soffermerà con maggiore attenzione visto il suo stretto collegamento con l'*Energy Amplifier*. Quindi si procederà ad un approfondimento sulla situazione, odierna e prevista, del settore elettronucleare, tenendo conto dei diversi fattori che influiscono sul suo sviluppo, tra cui vi sono le riserve di uranio e la possibilità di usare i combustibili MOX. Si presenteranno poi le fonti rinnovabili, considerandone tanto la condizione generale, quanto quella relativa ad ognuna di esse, con una particolare attenzione all'idroelettricità, che è la più sfruttata. Infine si passerà ad esporre alcuni progetti di ricerca di fonti alternative. Verrà qui introdotto l'*Energy Amplifier*, del quale si darà un'ampia descrizione, ponendo in particolare rilievo le numerose caratteristiche tecniche che giocano a suo favore.

Nel secondo capitolo si analizzerà invece il mercato energetico in generale e quello elettrico in particolare, studiandone la situazione attuale e prevista e presentando le principali linee della politica energetica mondiale, orientata verso una sempre maggiore liberalizzazione e un'attenta salvaguardia dell'ambiente. Infine, si darà un sintetico quadro della posizione a tale riguardo dei paesi OCSE, dell'Asia orientale e dei paesi in via di sviluppo, soffermandosi in dettaglio sul caso italiano che si rivela in tutta la propria singolarità.

Nella seconda parte si procederà al confronto tra i costi attesi di produzione di elettricità da parte di diversi impianti e si mostrerà come secondo le stime oggi disponibili, l'*Energy Amplifier* si riveli la forma di energia più conveniente.

Si analizzeranno in dettaglio i costi di investimento, i costi del ciclo del combustibile, quelli di esercizio e mantenimento e quelli totali, per vari tipi di impianti: a carbone, a gas naturale, nucleari ed *Energy Amplifier*. Si metteranno inoltre in risalto, per ognuno di essi quali siano i costi che influiscono maggiormente sui costi attesi totali e quali siano le implicazioni che ne derivano.

Quindi si proseguirà con un articolato confronto di ogni costo tra le varie fonti, ponendo in particolare risalto come l'impianto progettato dall'*équipe* di Rubbia sia caratterizzato da bassi costi del ciclo di combustibile e di esercizio e manutenzione (tanto a livello assoluto che percentuale), mentre il costo di investimento è simile in percentuale a quello del nucleare tradizionale, ma in termini monetari è più basso di quello del carbone. Queste caratteristiche permettono all'*Energy Amplifier* di dimostrarsi una fonte realmente competitiva dal punto di vista economico, aspetto sul quale si porrà un particolare risalto.

Nella terza e ultima parte, articolata in due capitoli, si esporranno i maggiori svantaggi, ambientali, sociali e politici, che si accompagnano allo sfruttamento delle fonti tradizionali e si mostrerà come l'*Energy Amplifier*, grazie alle sue caratteristiche tecniche, permette di risolverli in maniera diretta o indiretta secondo i casi e come si renda dunque necessario sostenere gli sforzi di R&S indispensabili a rendere realtà il progetto di Rubbia e della sua *équipe*.

Nel quarto capitolo, si procederà ad una dettagliata analisi dei problemi associati ad ogni singola fonte energetica. Si inizierà con le emissioni di gas-serra da parte dei combustibili fossili, facendo un breve *excursus* sulla storia degli accordi internazionali per la salvaguardia del clima dalla Conferenza di Rio del 1992 agli accordi di Kyoto del 1997. Si proseguirà quindi con un'approfondita valutazione dei numerosi svantaggi imputati all'energia nucleare tradizionale, mostrando come essi siano in parte soggetti ad esasperazione, nonostante la loro presenza effettiva; ci si soffermerà quindi sugli aspetti della sicurezza degli impianti, del confinamento delle scorie radioattive, del possibile traffico di plutonio, accennando al caso delle scorie nucleari italiane che, pur esistendo in grosse quantità, sembrano essere state dimenticate tanto dallo Stato quanto dall'opinione pubblica, da noi tradizionalmente avversa al nucleare. Infine, si parlerà dei molti impatti negativi che provengono anche dalle fonti rinnovabili, normalmente considerate "amiche dell'ambiente", concludendo con una valutazione economica delle esternalità associate alle principali energie convenzionali.

Nel quinto e ultimo capitolo si dimostreranno i vantaggi dell'*Energy Amplifier* in termini di sicurezza e ambiente, portando avanti l'esposizione, punto per punto, delle soluzioni di questa nuova fonte energetica ai diversi problemi legati a quelle tradizionali, ponendo in particolare rilievo la capacità dell'*Energy Amplifier* di bruciare le scorie radioattive provenienti dai reattori nucleari attuali, ricavandone elettricità. Non si tralascerà di ricordare la difficoltà nel mostrare all'opinione pubblica la differenza e la maggiore sicurezza intrinseca, nel progetto di Rubbia, rispetto alla normale energia nucleare. E proprio partendo da questo aspetto si mostrerà come la ricerca pura abbia dato al mondo non solo grandi teorie scientifiche, ma anche notevoli e quantificabili ricadute economiche e meriti dunque di essere finanziata. Infine si analizzerà la storia e lo stato attuale dei stanziati per l'*Energy Amplifier,* indicando la necessità di rendere disponibili i fondi per passare dalla fase teorica alla fase sperimentale del progetto, indispensabile per un suo futuro utilizzo industriale nel settore energetico, visti gli ampi vantaggi non solo economici.

Deborah Sessano

CAPITOLO 1
LE DIVERSE FONTI ENERGETICHE

1.1 – Il legame tra economia, energia e fisica

Per quanto strano possa sembrare, questi tre campi della conoscenza umana sono profondamente legati tra loro, in quanto strettamente interdipendenti: non ci può essere una crescita economica senza una crescita energetica che la sostenga, e non ci può più essere una crescita energetica senza una crescita delle conoscenze di fisica in generale, e di fisica nucleare nel caso particolare dell'energia atomica, ma non solo.

Ma, andiamo con ordine.

Oggigiorno uno degli argomenti maggiormente oggetto di interesse da parte di politici, industriali e tecnici è quello dell'energia: ognuno di noi è conscio del fatto che "l'energia è necessaria" per lo sviluppo dell'umanità.

Infatti, un elemento fondamentale del processo di civilizzazione del genere umano è sicuramente stato la capacità dell'uomo di trovare e sfruttare forme di energia sempre più potenti ed efficienti, dalla forza delle proprie braccia a quella degli animali a quella degli elementi naturali, e così via, in un continuo crescendo, fino ad arrivare all'energia nucleare.

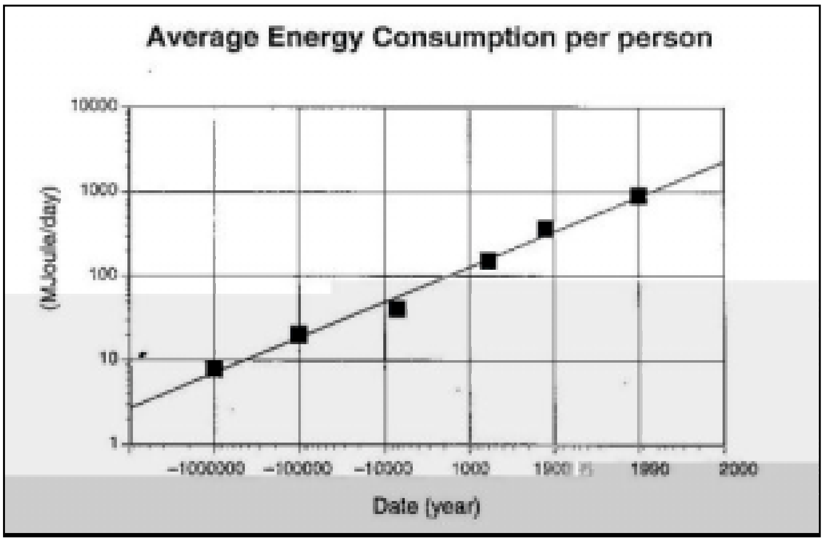
Ora, la relazione che lega energia ed economia è data dalla tecnologia. Infatti, il progresso tecnologico porta ad ottenere dei vantaggi, assoluti o relativi secondo i casi, poiché permette di aumentare la produzione e diminuire i costi, usando meno risorse per ottenere lo stesso risultato. Mai come negli ultimi due secoli il mondo aveva conosciuto una simile accelerazione delle proprie conoscenze tecnologiche.

Si può notare come il consumo di energia (si veda la fig.1) sia aumentato di circa cento volte dall'inizio della storia e come oggi raggiunga il livello di circa 0,9 GJ (250 kWh) al giorno a persona, il che equivarrebbe a 32 kW effettivi di carbone al giorno per persona e cioè ad una fornitura media continua di 10,4 kW/persona. In particolare, poi, il tasso di crescita del consumo totale di energia negli ultimi centocinquanta anni è stato pari al 2% annuo.[1]

---

[1] Per un paragone con la produzione di energia totale diretta del pianeta Terra, cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

Fig. 1 – Stima del consumo di energia pro-capite in funzione del tempo.



Fonte: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

In base al miglioramento delle condizioni di sviluppo e di benessere economico, e alla conseguente continua crescita del consumo di energia, è ragionevole attendersi una forte crescita della domanda di energia in vista del continuo aumento della popolazione mondiale (nel 1999, secondo l'ONU, abbiamo raggiunto quota sei miliardi), del miglioramento delle condizioni di vita nei PVS e del continuativo sviluppo nei paesi industriali. Infatti, è stato osservato che la quantità di energia disponibile influenza la crescita demografica, l'agricoltura, la capacità produttiva delle terre e l'alimentazione, le risorse idriche e la salute, l'istruzione, la divisione dei ruoli tra i sessi, l'emancipazione della donna, la creazione di posti di lavoro, e così via.[2] Sicuramente, dunque, l'energia verrà prodotta e sfruttata con maggiore efficienza, ma purtroppo questa è "una condizione necessaria, ma non sufficiente" a far fronte all'enorme aumento della sua richiesta.[3]

A quest'inopinabile verità sono associati non pochi problemi, tanto di carattere economico, quanto sociale e politico. Bisogna dunque trovare il modo migliore per produrre e sfruttare tutta l'energia di cui l'umanità avrà bisogno e di permetterne l'accesso a tutti i paesi, indipendentemente dal loro grado di sviluppo. Ma queste conoscenze non possono essere raggiunte senza l'ausilio della scienza pura e in particolar modo della fisica, scienza che studia, e quindi ci permette di comprendere, i principi di base del funzionamento dell'universo in ogni suo aspetto. Ed uno degli aspetti fondamentali dell'universo è l'energia.

---

[2] Cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

[3] Il tasso di crescita annuo atteso della produzione lorda di energia, a livello nazionale e mondiale, è di circa il 2%, ma attualmente nella zona asiatica (soprattutto per la Cina e per le quattro "tigri": Taiwan, Singapore, Hong Kong e Corea) è pari al 6-8%.

Ora, la forma di energia più potente, ma per questo anche la più preoccupante, a disposizione dell'umanità è l'energia nucleare. Ed è qui che entra in gioco la fisica nucleare, la quale ha il compito di capire e prevedere il comportamento delle particelle che costituiscono il nucleo, onde imparare a controllare le reazioni che avvengono al suo interno e l'energia che esse liberano. Una volta che questo funzionamento sia compreso appieno, si sarà in grado di usare tali reazioni a beneficio dell'umanità, garantendole la piena sicurezza e l'accesso ad una fonte energetica praticamente inesauribile.
Si tratta insomma di un processo circolare, in cui tutto si ricongiunge e si ricollega perfettamente: progresso economico, crescita energetica, progresso scientifico, cioè economia – energia – fisica.

Ma proprio per questa sua caratteristica interdisciplinare, la questione energetica è un problema di difficile approccio, in quanto necessita che si tenga conto di più variabili, alcune delle quali in contrapposizione tra loro: il mantenimento del livello di benessere nei paesi industrializzati, la facilitazione dello sviluppo dei paesi poveri e la salvaguardia della salute del pianeta. Di qui risulta chiaro come le questioni in gioco non siano semplicemente riducibili alla disponibilità e allo sfruttamento delle risorse energetiche, ma riguardino, più in generale, l'economia mondiale, i rapporti politici e l'ambiente. Dunque, è fondamentale che ognuno di noi, come singolo individuo e cittadino del mondo, prenda coscienza del problema energetico che, in un futuro non molto lontano, l'umanità si troverà a dover affrontare. Bisogna, infatti, avere quel senso di responsabilità e 'preveggenza' necessario per affrontare tutte quelle questioni che, quando diventeranno impellenti, non ci lasceranno più anni a disposizione per risolverle.
Per tale motivo ognuno ha il diritto, ed il dovere morale, di pensare alla risoluzione del problema delle fonti di energia, senza però lasciarsi andare a posizioni estremistiche. Non si può, dunque, demonizzare alcuna forma di energia, né le sorgenti fossili per l'emissione di gas serra, né il nucleare per le scorie radioattive e per la possibilità di eventi catastrofici, ma neppure si può idolatrare le fonti rinnovabili senza avere realmente conoscenza della loro applicabilità effettiva.
Infatti, è opinione diffusa tra scienziati e tecnici del settore energetico, che esista oggi un alto potenziale per sviluppare forme di energia che: 1) assicurino un'energia sicura, affidabile e accessibile alle generazioni presenti e future in modo efficiente; 2) abbiano un minore impatto ambientale; 3) possano aiutare ad armonizzare la non equilibrata distribuzione mondiale tra produzione e consumo di energia. Però, per ottenere tutti questi vantaggi dalle tecnologie finora sviluppate dobbiamo investire nella formazione, nella ricerca e in migliori strutture finanziarie e legali.
È stato giustamente affermato che "non esistono soluzioni facili o ovvie o che a priori siano scevre di risvolti dubbi o pericolosi. Tuttavia vanno ricercate. In prima istanza occorre farlo in laboratorio,

controllando ogni singolo componente del ciclo proposto; in seconda istanza, giungendo a realizzare dei prototipi, che mettano alla prova l'intero sistema".[4]

Ma per arrivare a vedere i vantaggi economici che queste nuove tecnologie potrebbero apportare, dobbiamo partire dall'analisi dello stato attuale del mercato energetico in generale, ed elettrico in particolare, e delle diverse fonti che lo alimentano: carbone, petrolio, gas naturale, rinnovabili e nucleare.

1.2 – Le fonti fossili: uno sguardo d'insieme

Le fonti fossili derivano dalla trasformazione di antichissimi organismi viventi in carbone, petrolio o gas attraverso la pressione o il calore e la mancanza d'aria all'interno della Terra.

La loro combustione è tuttora il principale metodo di generazione dell'elettricità. In questo campo, la tecnologia è molto ben sviluppata e i progressi sono legati a miglioramenti nei materiali. Qui la ricerca si occupa soprattutto di aumentare l'efficienza di sfruttamento e di diminuire l'impatto ambientale del processo di combustione. Da un punto di vista strettamente economico, si è notata la tendenza a diminuire i consumi di petrolio grezzo – visto il suo sempre maggiore prezzo – per produrre energia di base, e ad aumentare invece la domanda di gas naturale, grazie sia alla alta efficienza e veloce costruzione degli impianti a ciclo combinato, sia agli attuali bassi costi di questo combustibile. Sebbene il rispetto degli accordi di Kyoto dovrebbe, comunque, portare ad una diminuzione del numero delle centrali elettriche a combustibili fossili.

Ma il punto fondamentale, come ben sappiamo, è che essi sono una risorsa finita. Nonostante ciò risulta difficile fare una stima della loro durata residua, poiché ogni anno vengono scoperti nuovi giacimenti, poiché le tecniche di estrazione migliorano continuamente e per difficoltà nell'ottenere dati dai paesi dell'Asia centrale e orientale.

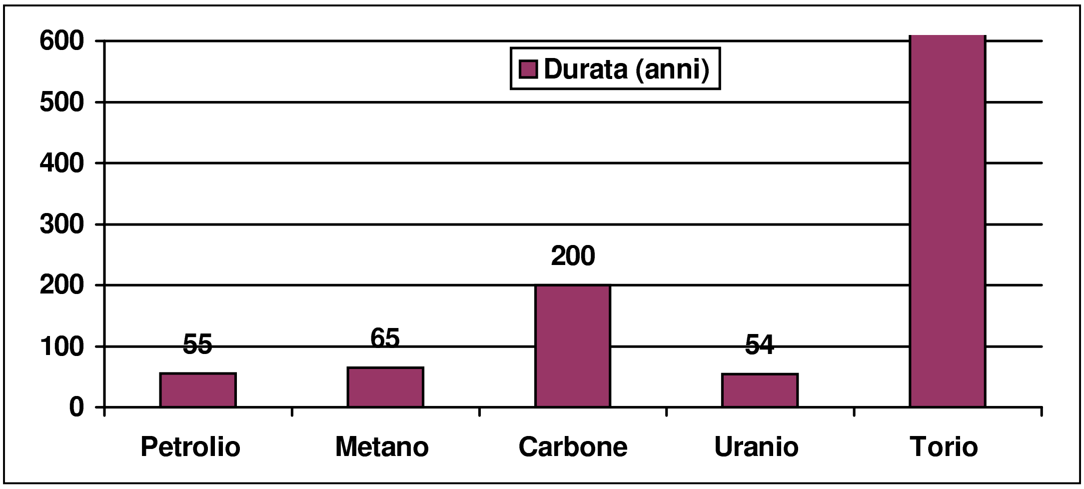
Comunque, secondo alcune stime ottimistiche le riserve di petrolio dovrebbero ammontare a 225 miliardi di tonnellate e si avrebbe il loro esaurimento attorno al 2070, secondo valutazioni più prudenti, invece, le scorte sarebbero di 138 miliardi di tonnellate e si esaurirebbero attorno 2040. Per il metano, invece, si è fatta una valutazione di riserve per 150.000 miliardi di metri cubi, sufficienti per almeno 60-70 anni.[5] Resta comunque sottinteso che le stime sono fatte ipotizzando un tasso di consumo energetico pari a quello attuale (o leggermente in crescita) e una disponibilità delle riserve pari a quella oggi stimata, dunque la durata effettiva potrebbe diminuire se aumentasse la quantità di energia richiesta.

---

[4] Cfr.: Sereni V., *"Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo*, in "Galileonet", anno III, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet/ archivio/index.html

[5] Cfr.: Bordieri F., *Ma non dicevano che stava per finire?*, in " Focus", n. 86, dicembre 1999, pp. 208-212.

Fig. 2 – Durata delle diverse fonti energetiche



Fonte: nostra elaborazione.

In linea generale è possibile affermare che la scarsità delle fonti fossili non è ancora un problema a livello mondiale. Infatti, non vi sono attualmente tendenze ad aumenti dei prezzi ascrivibili alla loro esauribilità, anche se è chiaro che prima o poi ciò si verificherà. In ogni caso, tra al massimo una sessantina d'anni, si dovranno trovare metodi di produzione di energia alternativi a quella proveniente dal petrolio e dal metano. Inoltre, se è lecito avere tali dubbi sulla longevità delle fonti fossili, è anche vero che la "data limite" per il loro utilizzo potrebbe essere ancora più vicina a causa del ben noto effetto serra (per una trattazione dettagliata di questo fenomeno si rimanda al cap. 4, par. 4.1).[6]

1.2.1 – Il carbone

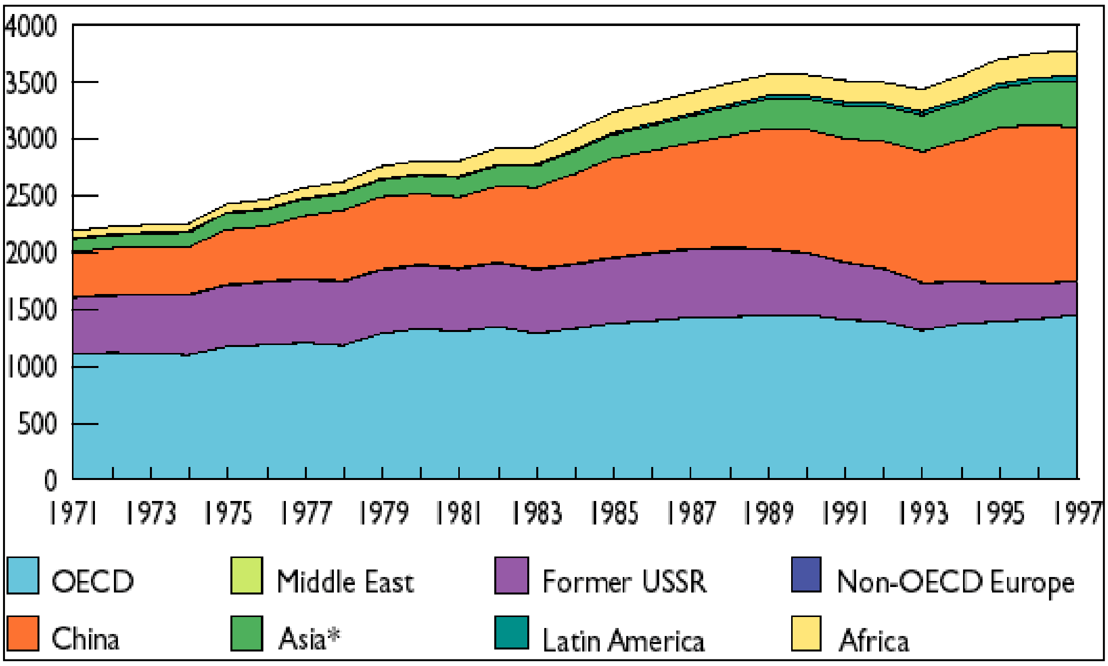
Ancora adesso il carbone è una delle più importanti fonti energetiche a disposizione dell'umanità. Esso viene utilizzato – tra gli altri impieghi – all'interno delle centrali termoelettriche per produrre elettricità, scopo per il quale esso copre, a livello mondiale, la percentuale più alta (38,4%) di generazione d'elettricità.

La produzione mondiale di carbone è cresciuta nel periodo compreso tra il 1973 ed il 1997, passando da 2.243 Mton (milioni di tonnellate) a 3.775 Mton, come si può notare in fig. 3.

---

[6] Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.

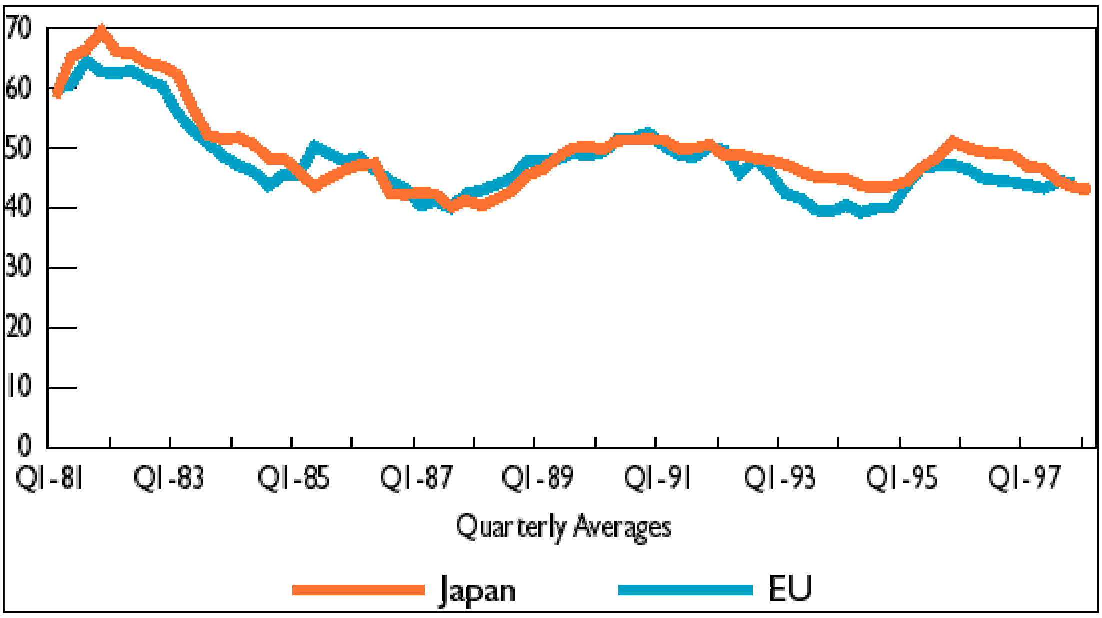
Fig. 3 – Andamento della produzione del carbone tra il 1971 e il 1997.



Fonte: IEA, *Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition.* Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm.

I maggiori produttori di carbone sono la Cina, gli Stati Uniti, l'India, il Sud Africa, l'Australia e la Russia, i quali sono anche tra i maggiori esportatori, insieme a Canada ed Indonesia. Per quanto riguarda le importazioni, invece, tra i paesi europei che maggiormente acquistano carbone troviamo: Paesi Bassi, Germania, Gran Bretagna e Italia, ad un costo medio di circa 43 $/ton nel 1997 (fig.4).

Fig. 4 – Andamento del prezzo di importazione del carbone tra il 1981 e il 1997.



Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

In ogni caso, come abbiamo già avuto modo di vedere, il carbone è il combustibile fossile che durerà più a lungo (tra i 190 ed i 230 anni) e proprio per questo si prevede che esso possa soddisfare eventuali aumenti della domanda, da parte del settore energetico, senza particolari problemi, infatti i tempi di costruzione delle centrali a carbone permetterebbero, al settore dell'offerta di questo combustibile, di adeguarsi in tempo utile.

In termini qualitativi, poi, si può affermare che tra i principali vantaggi del carbone come fonte energetica vi siano il basso costo, la facilità di estrazione (soprattutto negli Stati Uniti e in Russia), la facilità di incenerimento e una conoscenza secolare del suo comportamento. Ciononostante, ha alcuni grossi svantaggi, quali la necessità di dispendiosi sistemi di controllo per la contaminazione dell'aria, alti costi di trasporto e, dal punto di vista ambientale, un forte contributo all'inquinamento atmosferico, alle piogge acide e al riscaldamento globale del pianeta.[7]

Proprio per questo motivo è già stata da più parti[8] proposta una tassa sulle sue emissioni, la cosiddetta carbon-tax, la quale permetterebbe di confrontare in termini di costi e benefici le diverse fonti energetiche, di introdurre degli elementi correttivi onde evitare un forte aumento nei prezzi dei combustibili fossili all'avvicinarsi del loro esaurimento, ed infine di spronare la ricerca scientifica tanto verso una sempre maggiore efficienza, quanto verso nuove fonti.

1.2.2 – Il petrolio

Il petrolio è alla base della moderna economia e, forse, anche alla base della nostra società, in quanto esso è la fonte energetica primaria; basti pensare che nel settore energetico come unità di misura viene spesso utilizzato il Tep, e cioè tonnellata equivalente di petrolio. La sua importanza deriva dal fatto che da esso si possono estrarre, oltre all'energia, anche una serie di derivati (cherosene, nafta, benzina, ecc.) che trovano larghissime applicazioni negli impieghi industriali più diversi: dai detergenti ai filati, dalle materie plastiche all'industria chimico-farmaceutica.[9]

Ma pur essendo la fonte energetica primaria, il petrolio è andato incontro ad un forte declino all'interno del settore di produzione dell'elettricità. Infatti tra i paesi dell'OCSE vi è stata una forte diminuzione del suo utilizzo nelle centrali termoelettriche a partire dal 1973, quando produceva, in media, il 26% dell'elettricità totale, fino ad oggi, dove la sua quota si è ridotta all'8-9%, tranne che nel caso dell'Italia e del Messico, dove esso fornisce ancora una notevole parte dell'elettricità richiesta. Ben quattro quinti dei 200 GW[10] prodotti nel mondo oggi, sono concentrati in solo sei

---

[7] Per un'analisi dettagliata degli impatti ambientali dei combustibili fossili si rimanda al cap. 4, par. 4.1.

[8] Si confrontino ad esempio: Sereni V., *"Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo*, in "Galileonet", anno III, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet/archivio/index.html e Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.

[9] Cfr.: Vitagliano G., Energia per tutti. Un'esposizione chiara per capire meglio l'energia, 21mo Secolo, Milano 1998.

[10] Si ricordi che 1 TW= $1{\cdot}10^9$ kW = $1{\cdot}10^{12}$ W, che 1 GW= $1{\cdot}10^6$ kW = $1{\cdot}10^9$ W e che 1 MW= $1{\cdot}10^3$kW= $1{\cdot}10^6$ W.

paesi. (tab. 1); per tale motivo gli impianti a petrolio vengono esclusi dagli studi comparati di generazione dell'elettricità ed è quindi difficile trovare dati sui loro costi.[11]

Tab. 1 – Centrali a petrolio nell'OCSE e loro percentuale sulla produzione nazionale di elettricità

Paese	GW della centrale	Percentuale, 1990-94
Giappone	63,0	27%
USA	47,1	4%
Italia	18,3	49%
Messico	18,0	55%
Francia	9,0	2%
Gran Bretagna	8,0	9%
Altri	36,6	4%

Fonte: Paffenbarger J., Despite increasing refinery power production, oil-fired generation is declining, IEA. Sito Internet: http://www.iea.org/pub.htm.

Attualmente, "l'oro nero" ha quattro funzioni principali nel mercato dell'offerta di elettricità, e precisamente:

- soddisfare la domanda in momenti di massima richiesta,
- permettere una flessibilità operazionale e di previsione,
- fornire energia in zone remote o isolate,
- garantire la fornitura di energia di base, quando non ci sono alternative più economiche.

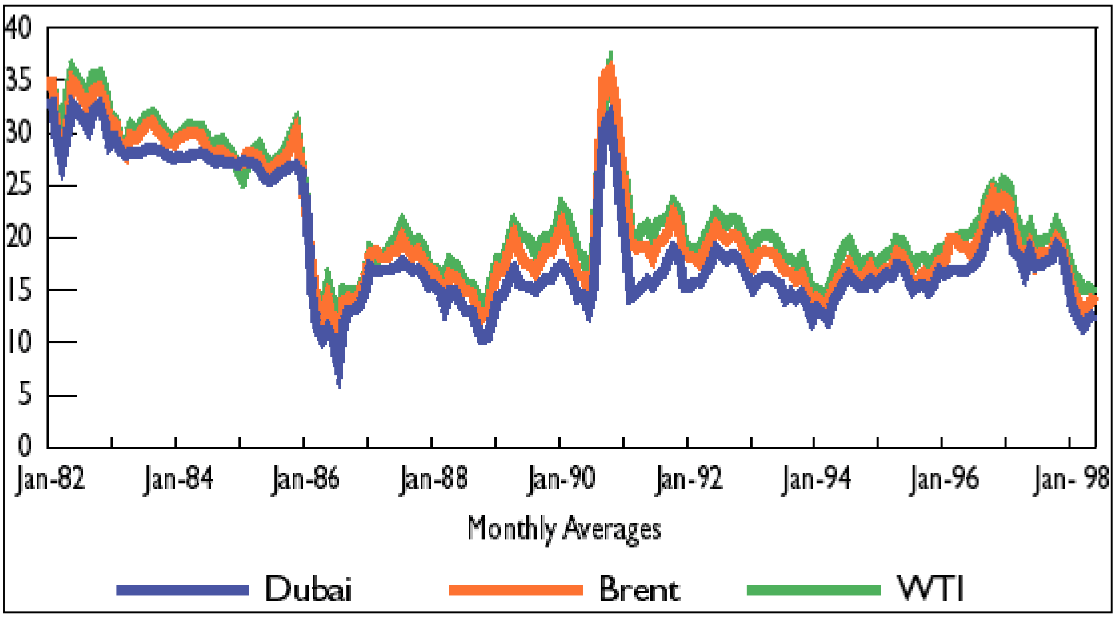
Al di fuori di questi impieghi, è prevista una continua diminuzione del petrolio come fonte di energia elettrica. Unico possibile segno in senso contrario è l'autoproduzione di elettricità da parte di sempre più numerose raffinerie che sfruttano i residui di basso valore del petrolio. Ma se si esclude tale utilizzo, gli alti costi marginali della produzione di energia di base con il petrolio e l'incertezza nell'approvvigionamento confineranno l'uso di questo combustibile solo alla copertura di picchi inattesi della domanda, come dimostra il fatto che solo una minima parte delle centrali a petrolio sarà rimpiazzata al termine della loro vita utile, tra una quindicina d'anni, e unicamente per assicurare la copertura di potenze di punta. In ogni caso, queste centrali presentano i vantaggi di: una buona distribuzione per i livelli di utilizzo, la facilità di reperimento a livello geologico, la loro validità come fonti di riscaldamento. Tra gli svantaggi, vi sono soprattutto una limitata disponibilità (dovuta al fatto che l'estrazione avviene per lo più in paesi politicamente instabili, come ci hanno dimostrato le crisi petrolifere degli anni '70, e come stiamo vedendo in questo periodo), una forte variabilità dei prezzi sia d'offerta che di domanda, la dispendiosità per la generazione di energia di base e infine il fatto di contribuire all'effetto-serra.[12]

---

[11] L'Italia produce il 49% dell'elettricità attraverso il petrolio, in più c'è solo il Messico.
[12] Cfr.: Anonimo, *Comparison of various energy sources.* Sito Internet: http://www.cannon.net/~gonyeau/nuclear/why.htm

I maggiori produttori di petrolio sono l'Arabia Saudita (che produce il 12,8% della quantità mondiale), gli USA (11,1%), la Russia (8,8%), l'Iran, il Venezuela, il Messico, la Cina e la Norvegia (tutti con quote comprese tra il 5,3 e il 4,5%) ed infine il Regno Unito (3,7%) e gli Emirati Arabi (3,5%). La cosa maggiormente degna di nota è che questi dieci paesi, da soli, estraggono ben il 64,4% del petrolio prodotto in tutto il mondo. Ma la questione diventa ancora più interessante se si va ad analizzare quali sono i maggiori esportatori di petrolio: Arabia Saudita, Norvegia, Russia, Iran, Emirati, Venezuela, Nigeria, Regno Unito, Messico e Kuwait. Gli Stati Uniti, invece, nonostante siano i secondi produttori al mondo di petrolio, ne sono anche i primi importatori (per 432 Mton), seguiti da Giappone (225 Mton), Germania (104 Mton) e più in là Francia e Italia (rispettivamente 84 e 82 Mton). Per quanto riguarda il prezzo del petrolio, esso è diminuito, tra il 1982 ed il 1997, passando da circa 33$/barile fino ai circa 10$/barile di gennaio '98, se si esclude il picco del 1991, dovuto alla guerra del Golfo, (fig. 5).

Fig. 5 – Andamento del prezzo del petrolio tra il 1982 ed il 1997.

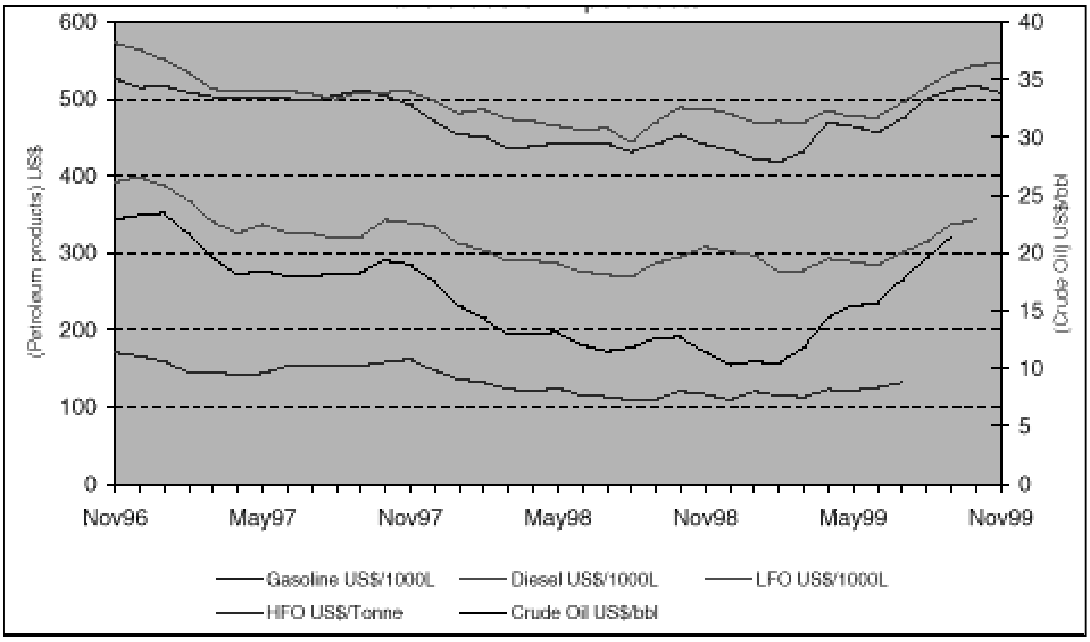


Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Ben diverso è stato invece l'andamento dei prezzi dai primi mesi del 1998 ad oggi (febbraio/marzo 2000), in cui il petrolio ha raggiunto e superato la quotazione di 30$/barile. L'attuale periodo di aumento del prezzo del petrolio ha avuto inizio a marzo 1999, quando si è formato un cartello tra i paesi dell'OPEC ed altre nazioni produttrici di petrolio, tra cui anche la Norvegia, hanno deciso di ridurre la produzione giornaliera di 3-4 milioni di barili, per rispondere all'eccessiva diminuzione del prezzo del greggio – che stava scendendo sotto i 10$/barile – dovuta all'aumento delle esportazioni (circa un milione di barili in più al giorno) da parte dei russi (fig. 6).

Per quanto riguarda l'andamento futuro, si riscontra una forte precauzione nelle previsioni, le quali si limitano generalmente a notare che la domanda di petrolio e dei suoi derivati aumenteranno, entro il 2020, passando da 62,7 a 72,2 milioni di barili al giorno per il greggio e da 9,3 a 20,6 milioni di barili al giorno per i derivati. Di conseguenza si prevede un aumento del prezzo del petrolio, nel lungo periodo, fino ad un costo più o meno stabile di 25-30 $/barile.[13]

Fig. 6 – Andamento dei prezzi del petrolio e dei suoi derivati da Nov. '96 a Nov.'98.



Fonte: IEA, *Memorandum. Oil price trends*, 2 dicembre 1999. Sito Internet: http://www.iea.org/pub.htm.

1.2.3 – Il gas naturale

In seguito alla forte diminuzione nell'utilizzo del petrolio per la produzione di energia elettrica, si è avuto un notevole incremento nell'impiego tanto di gas naturale quanto di GPL (Gas di Petrolio Liquefatto). Infatti, in paesi come Italia, Francia, Germania, Giappone e Inghilterra, in seguito alla diminuzione del loro prezzo fra il 1987 e il 1992, si è avuto un aumento del 20-40% del loro consumo, contro aumenti del 10-20% di quello di petrolio.[14] Sebbene, il loro *share* nella produzione di elettricità non abbia subito – a livello mondiale – eccessive variazioni, essendo passato dal 12,1% del 1973 al 14,8% del 1997.

Esattamente come gli altri combustibili fossili, anche la produzione del gas naturale è aumentata, passando da 1.233 a 2.296 miliardi di metri cubi.

---

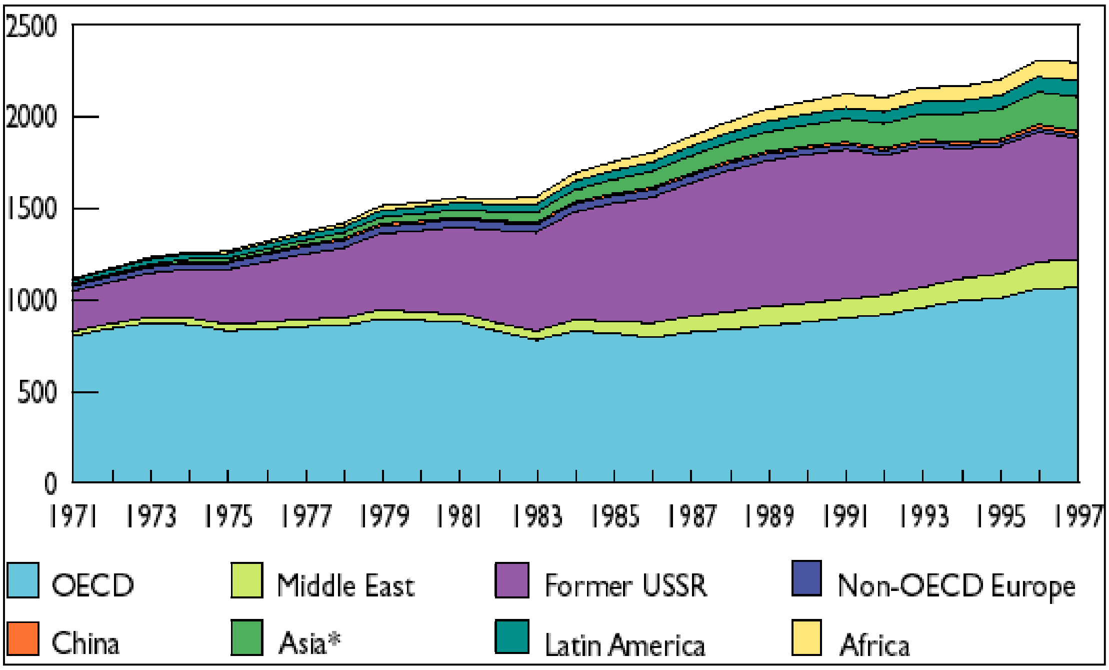
[13] Cfr.: Anonimo, *Oil supply prospects*, IEA. Sito Internet: http://www.iea.or/g8/world/oilsup.htm

[14] Cfr.: Costa G., *Metano e GPL restano insostituibili*, in "Lettere Triestine", gennaio 1996. Sito Internet: http://www.spin.it/lettere-triestine/gpl.html

I maggiori produttori ed esportatori di gas naturale sono la Russia, il Canada e l'Irlanda, tra i maggiori produttori poi vi è anche la Gran Bretagna. Dal punto di vista dei paesi che importano il gas abbiamo invece Germania, USA (sebbene siano i secondi produttori al mondo), l'Italia e la Francia.[15]

Il costo medio del gas naturale d'importazione è fortemente diminuito tra il 1981 ed il 1997, sebbene vi sia stato un picco nel 1991 almeno per l'Europa in concomitanza con la guerra del Golfo e, quindi, del prezzo del petrolio.

Fig. 7 – Produzione di gas naturale dal 1971 al 1997 (miliardi di metri cubi).



Fonte: IEA, Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition, op. cit.

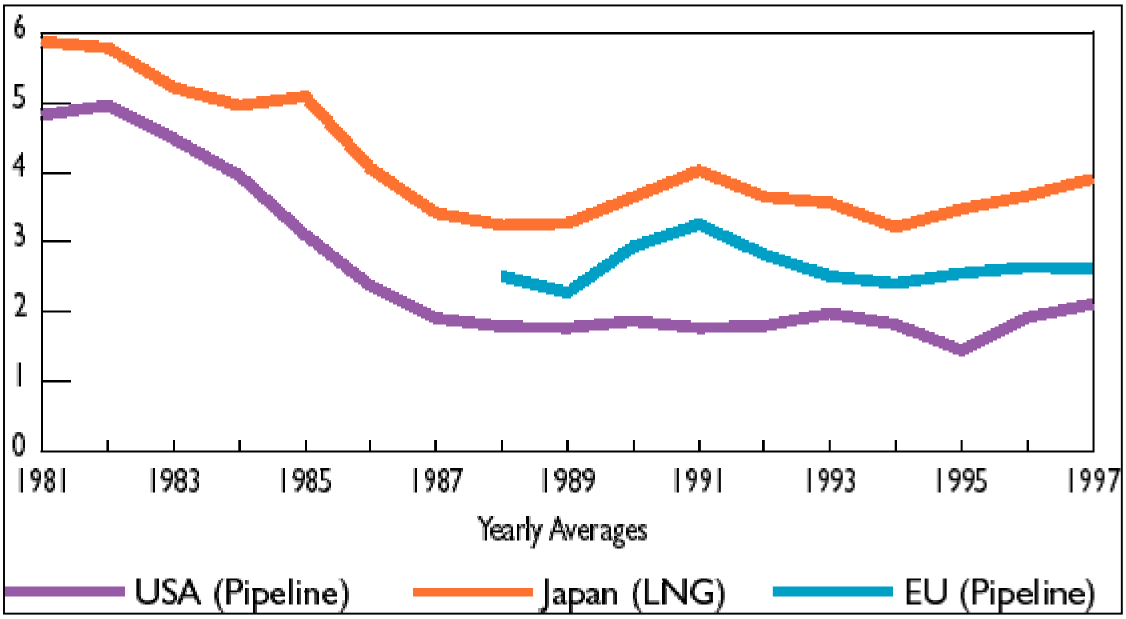
Proprio a questo riguardo è importante ricordare il legame che esiste tra l'andamento del prezzo del petrolio e quello del metano. Infatti, soprattutto prima degli *shock* petroliferi degli anni '70, il gas naturale ed il petrolio erano in forte competizione nel settore energetico, dunque vi era un legame dal lato della domanda nel loro prezzo. Inoltre, in molti mercati i due prezzi erano contrattualmente legati, per cui le oscillazioni del prezzo del petrolio si riflettevano immediatamente su quelle del metano.[16] Negli ultimi anni invece, grazie alla liberalizzazione del mercato del gas naturale, il suo prezzo ha avuto la tendenza ad essere più indipendente dal prezzo del petrolio.

---

[15] Cfr.: IEA, *Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition*. Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm

[16] Cfr.: Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, OECD Publications, Paris Cedex 1998.

Fig. 8 – Andamento del prezzo del metano tra il 1981 e il 1997 (in $/MBTU).



Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Per quanto concerne il futuro del gas naturale, è opinione diffusa che vi sarà un notevole aumento nella sua produzione, che dovrebbe passare dalle 1.819 Mtep del 1995 alle 3.807 Mtep nel 2020. Tra i principali motivi di questo incremento troviamo la sicurezza d'approvvigionamento (l'OCSE produce il 46,5% della quantità totale di gas) ed il basso impatto ambientale, che lo fanno preferire al petrolio come combustibile per la generazione d'elettricità.

Ma se da una parte metano e GPL, qualora siano paragonati agli altri combustibili fossili, presentano il vantaggio di avere emissioni molto minori di anidride carbonica (circa il 25-30% in meno) e una quasi totale assenza di anidride solforosa. Dall'altra parte, questi due gas hanno degli inconvenienti tutt'altro che trascurabili che derivano proprio dal loro stato fisico. Infatti, essendo allo stato gassoso, essi possono mescolarsi all'aria e dunque creare il rischio di uno scoppio della miscela. Simili "effetti lanciafiamme" possono anche essere causati dalla rapida evaporazione del GPL vero e proprio. Inoltre, come gli altri combustibili fossili, anch'essi necessitano di grandi impianti, con i conseguenti problemi di impatto ambientale e paesaggistico. Infine, resta in piedi la questione del loro esaurimento "a breve termine" – si ricordi che si parla di una sessantina d'anni – poiché sono anch'essi dei combustibili fossili, non auto-rigenerantisi, se non nel lunghissimo periodo e quindi sono risorse scarse per definizione.

Concludendo, spesso in passato si è ritenuto che il petrolio ed il gas naturale fossero troppo costosi per muovere una seria concorrenza al carbone nel produrre elettricità. Oggi però, si pensa che in futuro saranno gli impianti a ciclo combinato di gas-vapore a fornire la copertura del carico di base, a prezzi inferiori a quelli delle centrali nucleari e a carbone. In effetti, il metano potrà poi godere degli incentivi ambientali che portano a spostarsi dal carbone ad esso. Nel frattempo, è sicuro che nel prossimo decennio vi sarà un forte aumento nella quota di energia elettrica fornita dal gas naturale in tutti i paesi OCSE, anche grazie ai tempi di costruzione ridotti e ai costi di investimento inferiori richiesti da un impianto a metano o a ciclo combinato.[17]

1.3 – L'energia nucleare

Fino alla prima metà di questo secolo, tutte le fonti energetiche conosciute (vapore, carbone, petrolio e gas) si basavano su reazioni fra atomo ed atomo e sfruttavano l'energia chimica che queste interazioni emettono.

Con la scoperta e l'avvento dell'energia nucleare si è invece passati a delle reazioni che avvengono all'interno degli atomi – nei nuclei, appunto – poiché in esse si ha la rottura (fissione) del nucleo di un elemento pesante con la conseguente emissione di energia, che è dunque energia nucleare e che è notevolmente maggiore di quella chimica a parità di combustibile usato.[18]

L'energia nucleare presenta indiscutibilmente alcuni vantaggi rispetto alle fonti fossili: non emette gas inquinanti e fa un uso alquanto 'parsimonioso' del combustibile. In effetti, se si arrivasse a sfruttare (o, in termini di fisica nucleare, a fissionare) interamente una tonnellata di uranio, essa produrrebbe un'energia pari a quattordici milioni di barili di petrolio o a tre milioni di tonnellate di carbone.[19] Così dunque, si potrebbe soddisfare la domanda mondiale di energia (10 TW) con circa 3900 Ton di uranio l'anno – quando la produzione attuale è di circa 100.000 Ton l'anno.[20]

Purtroppo per noi, però, oggigiorno soltanto lo 0,7% dell'uranio disponibile è effettivamente utilizzabile. Ed ecco perché, allo stato attuale delle cose, le riserve di combustibile fissile sono soggette allo stesso destino di esaurimento – in tempi "brevi" – delle fonti fossili. Ed ecco perché, la produzione di energia dal nucleare non si trova in una posizione migliore rispetto a quella tradizionale.[21] Ma come sappiamo, ben altri sono i motivi a sfavore dell'energia nucleare attuale: le scorie radioattive a lunga vita (transuranici e attinidi minori), gli incidenti di fusione del nocciolo del reattore (Chernobyl e Three Mile Island), i legami con gli armamenti nucleari, la scarsa efficienza termodinamica (cioè, la frazione di energia termica che diventa elettricità).

---

[17] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

[18] Cfr.: Buono S., *La pattumiera atomica*, in "Newton", n. 10, ottobre 1999, pp. 142-157.

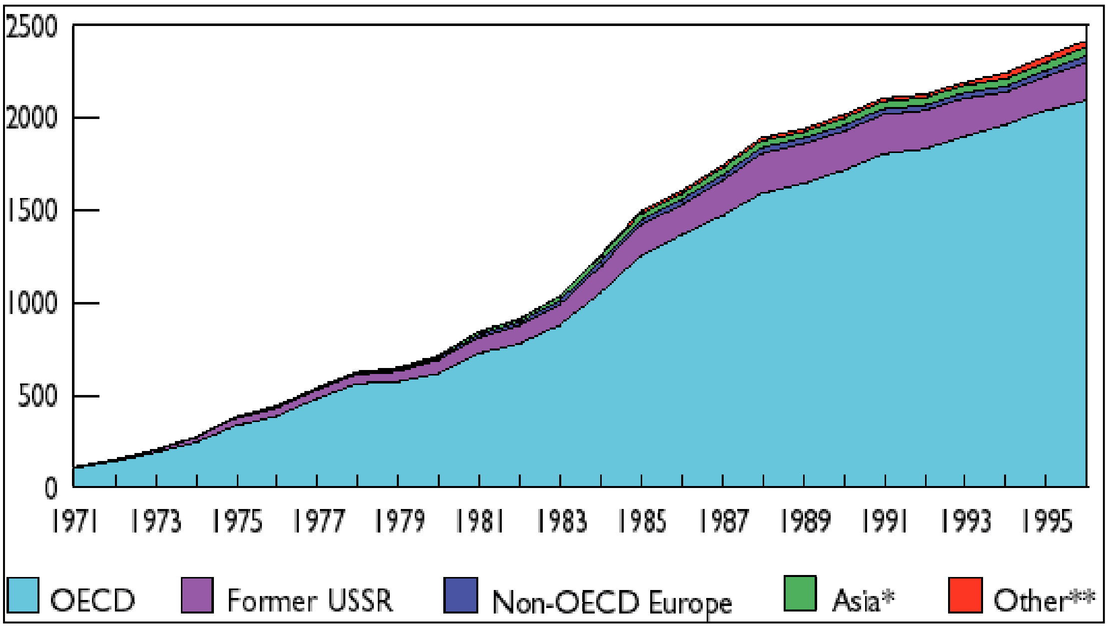
[19] In pratica, il guadagno potenziale nella produzione di energia nucleare è di circa $3x10^6$ volte maggiore rispetto all'energia chimica. Cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

[20] Per una breve descrizione del funzionamento delle centrali nucleari più comuni in Occidente si rimanda all'appendice, par. A.1.

[21] Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

Per quanto il nucleare possa venire demonizzato, esso costituisce pur sempre la terza maggiore fonte di energia elettrica nel mondo, coprendo il 17,7% della produzione totale di elettricità.
Anche la storia del nucleare – come quella di ogni altra fonte – è legata al petrolio, ed in particolare alla "paura" generata dagli shock petroliferi degli anni '70, ai quali il mondo ha risposto cercando di diminuire il consumo dell'oro nero e di darsi una maggiore indipendenza energetica, puntando in parte (almeno fino a Chernobyl) sul nucleare, la cui produzione di energia è passata dai 203 TWh (circa 17,5 Mtep) del 1973 ai 2.416 TWh (circa 208 Mtep) del 1996 con un incremento del 1000%, e ben l'86,6% di questa elettricità è prodotta da paesi OCSE (contro l'8,5% dell'ex-Unione Sovietica).

Fig. 9 – Produzione di energia nucleare dal 1971 al 1996 (in TWh).



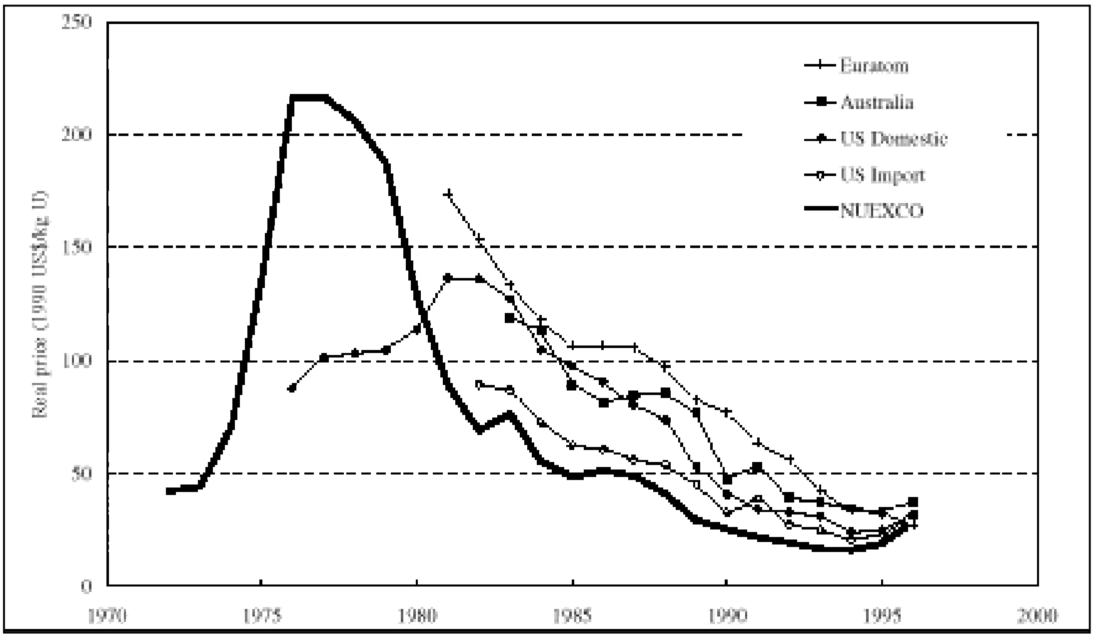
Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Tra i maggiori produttori, troviamo nell'ordine, dal primo al sesto, gli Stati Uniti, la Francia, il Giappone, la Germania, la Russia, la Gran Bretagna e, solo al decimo posto, la Svezia. Ma ancora più interessante è notare la percentuale di elettricità nazionale prodotta dall'energia nucleare in questi paesi: in Francia si ha la quota più alta del mondo, con il 78,2%, in Svezia il 52,5%, in Giappone il 30,1%, in Germania il 29,1%, in Gran Bretagna il 27,3%, negli USA il 19,6% e in Russia il 12,9%.[22]
Per quanto riguarda i prezzi del combustibile nucleare, sebbene essi fossero piuttosto elevati durante gli anni '70 ed i primi anni '80, a partire dal 1986 hanno iniziato a diminuire fortemente in tutto il mondo. Inoltre, se prima il prezzo dell'uranio differiva di oltre un fattore due a seconda del mercato specifico, durante gli anni '90 si è avuta una convergenza verso il basso, il che indica come ci si sia

[22] Cfr.: IEA, *Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition* . Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm

orientati verso un mercato globale dell'uranio, passando da un costo medio di circa 150 $/kgU del 1980 ad uno di circa 30 $/kgU nel 1996 (fig.10).

Fig. 10 – Andamento del prezzo dell'uranio nei mercati OCSE tra il 1972 e il 1996.



Fonte: Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998.* OECD Publications, Paris Cedex 1998.

Infine, nonostante l'indipendenza del prezzo dell'uranio, anche l'industria nucleare è influenzata dal prezzo dell'oro nero e dalle sue oscillazioni. Infatti, sono proprio queste variazioni "improvvise" a danneggiare maggiormente il settore elettronucleare, al quale – come ad ogni altro settore industriale pesante – sono necessari una decina d'anni per costruire un'unità produttiva.[23]

1.3.1 – Situazione Attuale

Numerosi studi condotti in vari paesi mostrano come l'energia elettronucleare (e qui si intende tanto il nucleare tradizionale, quanto il nucleare di seconda generazione che è in fase di studio) si dimostri più che competitiva delle altre fonti per vari aspetti:

- apporta un miglioramento alla bilancia dei pagamenti delle nazioni importatrici di combustibili fossili;
- permette la stabilizzazione dei prezzi, determina un notevole contributo positivo alla crescita economica nazionale, crea nuovi posti di lavoro;

[23] Georges Charpak è membro dell'Accademia delle scienze francesi, ha ricevuto il premio Nobel per la fisica nel 1992 e fa parte del CERN dal 1959. Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

- si rivela l'unico mezzo di generazione termica presente sul mercato privo di emissioni di gas inquinanti e capace di avere il pieno controllo sulle scorie generate;[24]
- crea economie esterne in svariati settori industriali e commerciali non direttamente legati al comparto nucleare.

Il fatto che nell'ultimo decennio vi siano stati relativamente pochi reattori nucleari costruiti e messi in opera nei paesi occidentali (solo Francia e Giappone stanno costruendo nuove centrali), non deve far credere che vi sia stato un sostanziale ripensamento verso questa forma di energia. In effetti, questa situazione dipende soprattutto da una contingenza di fattori che hanno influito sul settore nucleare.

In passato infatti, vi sono stati una serie di studi previsionali su questa forma di energia che hanno condotto a delle conclusioni sbagliate. A seguito delle crisi petrolifere del '73-'74 e del '79-'80, si era ritenuto che vi sarebbe stato un forte riorientamento della domanda energetica verso il nucleare. Ma in realtà, nei paesi occidentali, si rispose a questa situazione diminuendo il consumo di energia e spostandosi verso una maggiore efficienza nella produzione di elettricità, piuttosto che verso l'installazione di nuove centrali elettriche di qualunque tipo. Ecco dunque che in più di un caso si ebbe addirittura un surplus di capacità produttiva, un'eccedenza di combustibile a basso prezzo ed una diminuzione delle prospettive di sbocco a breve termine.

In più, la prevista ripresa del mercato negli anni Novanta non si è verificata a causa degli avvenimenti politici che hanno scosso l'Europa orientale.

A tutto ciò si deve aggiungere anche la sistematica opposizione ambientalista – aizzata dalle *lobby* del petrolio e del carbone – che ha trovato un forte appoggio in seguito agli incidenti di Three Mile Island e di Chernobyl (si pensi alla mistificatoria campagna contro l'incidente di Three Mile Island, che non ha provocato né vittime né dispersione di elementi radioattivi) . Questo ha portato anche ad una diminuzione della competitività economica del nucleare a causa dei continui miglioramenti alla sicurezza richiestigli e quindi ad un aumento dei costi di sviluppo e di autorizzazione. In molti paesi c'è stato il blocco dello sviluppo nucleare, senza però che si prendesse la decisione di bloccare le centrali esistenti, né quelle in costruzione.

[24] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare* , op. cit.

Tab. 2 – Situazione del nucleare nel mondo alla fine del 1998.

	Reattori in funzione		Reattori in costruzione		Elettricità fornita nel 1998		Esperienza operativa totale a dicembre 1998	
Paese	Centrali	MWe Totali	Centrali	MWe Totali	TWh	% sul totale	Anni	Mesi
Argentina	2	935	1	692	6.93	10.04	40	7
Armenia	1	376			1.42	24.69	31	3
Belgio	7	5712			43.89	55.16	156	7
Brasile	1	626	1	1229	3.27	1.08	16	9
Bulgaria	6	3538			15.49	41.50	101	1
Canada	14	9998			67.50	12.44	405	2
Cina	3	2167	6	4420	13.46	1.16	17	5
Repubblica Ceca	4	1648	2	1824	12.35	20.50	50	8
Finlandia	4	2656			20.98	27.44	79	4
Francia	58	61653	1	1450	368.40	75.77	1052	1
Germania	20	22282			145.20	28.29	570	7
Ungheria	4	1729			13.12	35.62	54	2
India	10	1695	4	808	10.15	2.51	159	1
Iran			2	2111				
Giappone	53	43691	2	1863	306.94	35.86	863	5
Kazakhstan	1	70			0.09	0.18	25	6
Corea RP	15	12340	3	2550	85.19	41.39	137	5
Lituania	2	2370			12.29	77.21	26	6
Messico	2	1308			8.83	5.41	13	11
Paesi Bassi	1	449			3.59	4.13	54	
Pakistan	1	125	1	300	0.34	0.65	27	3
Romania	1	650	1	650	4.90	10.35	2	6
Russia	29	19843	4	3375	95.38	13.08	613	6
Sud Africa	2	1842			13.58	7.25	28	3
Slovacchia	5	2020	3	1164	11.39	43.80	73	11
Slovenia	1	632			4.79	38.33	17	3
Spagna	9	7377			56.68	31.66	174	2
Svezia	12	10040			70.00	45.75	255	2
Svizzera	5	3079			24.37	41.07	118	10
Regno Unito	35	12968			91.14	27.09	1168	4
Ucraina	16	13765	4	3800	70.64	45.42	222	1
USA	104	96423			673.70	18.69	2351	8
TOTAL*	434	348891	36	27536	2291.41		9012	6

Fonte: IAEA, *Nuclear power status in 1998*. April 1999. Sito Internet: http://www.iaea.org/worldatom/Press/P_release/1999/prn0499.shtml

L'insieme di questi fattori come già detto, ha fatto sì che la posizione del nucleare si sia ritrovata ad un livello inferiore rispetto a quello atteso. Ma, a conti fatti, i risultati ottenuti da questa industria sono complessivamente positivi, come dimostra l'apporto nucleare alla produzione di energia elettrica: circa il 17% nel mondo, il 25% nei paesi OCSE e il 35% in Europa; e come dimostrano i 434 reattori sparsi per il mondo tab.2).[25]

---

[25] Cfr.: Anonimo, *Relazione introduttiva*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

Queste cifre mostrano chiaramente come sia errata l'idea che in seguito al disastro di Chernobyl la fonte nucleare sia stata oggetto di ripensamenti in tutto il mondo. In realtà, ciò è avvenuto solo nel nostro paese. Invece, negli altri 32 paesi, da allora la sua potenza è aumentata del 40%, fino agli attuali 350.000MWe, e ad oggi sono in costruzione 36 nuove centrali, in 15 nazioni diverse, per una potenza aggiuntiva di 33.700 MWe. Degno di attenzione è anche il dato sull'esperienza operativa accumulata in questo settore, pari a ben 9.012 anni, che dimostra come i due incidenti nucleari di Chernobyl e Three Mile Island Siano ben poca cosa in confronto al contributo totale dato da questa fonte energetica alla generazione di elettricità in tutto il mondo.

È inoltre interessante notare come, riguardo al nucleare, i paesi industrializzati si dividano in due categorie (con carbone e senza), quelli con carbone (USA, Germania, GB, ecc.) sono contro il nucleare, mentre quelli senza carbone (Francia, Giappone, ecc.) sono per il nucleare.[26]

Se però si desse ascolto agli ambientalisti europei e si decidesse effettivamente di chiudere, in una sola volta, tutte le centrali nucleari presenti nell'EU, si andrebbe incontro a seri problemi, generati a cascata da un vero e proprio "buco energetico"[27]. Tanto per iniziare Belgio, Francia e Germania si troverebbero di colpo privi, rispettivamente, del 75, 78 e 35% dell'energia elettrica.[28] E poiché molte case sono ormai riscaldate elettricamente, milioni di persone ricorrerebbero, come soluzione di fortuna, al gas naturale per non restare al freddo; inoltre, per mantenere il livello energetico europeo dovrebbero essere installati più di 100.000 MW basati su fonti fossili; tutto ciò porterebbe ad un aumento non indifferente delle tanto "odiate" emissioni di gas-serra. Ma non solo, in seguito ad una chiusura "improvvisa" dei reattori nucleari europei, si creerebbe anche un'ondata di disoccupazione non indifferente (ricordiamo che non vi sono solo i posti di lavoro direttamente collegati alle centrali, ma anche quelli delle diverse imprese satellite che vivono in simbiosi al funzionamento della centrale). E, infine, l'Europa non sarebbe comunque al sicuro dal pericolo nucleare, visto lo stato catastrofico in cui versano le, già di per sé non sicure, centrali ex-sovietiche, le quali ci hanno già dimostrato quanto poco le eventuali nubi radioattive si curino delle scelte politico-energetiche degli uomini.[29]

1.3.2 – Le riserve di uranio

E' stato stimato che le risorse uranifere "conosciute" consistono in 2,5 milioni di tonnellate recuperabili a meno di 80$/kgU e in 1,1 milioni di tonnellate a meno di 130$/kgU localizzate

---

[26] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.
[27] Cfr.: Regge T., *Centrali russe, spada di Damocle*, in "TuttoScienze", allegato de "La Stampa", 3 marzo 1999.
[28] Si tratta qui delle percentuali di energia nucleare, nazionali e non, fornite al settore elettrico.
[29] Per una breve descrizione delle strategie gestionali tanto per il nucleare attuale quanto per quello di seconda generazione si rimanda all'appendice, par. A.2 e A.3.

soprattutto in Australia, Nord America e Sud Africa. Mentre non sono incluse le riserve disponibili in Cina e in Europa centrale e orientale a causa dell'impossibilità di ottenere dati precisi.
Ora, se la quantità di uranio a disposizione dell'umanità consistesse nelle sole riserve "conosciute", all'attuale ritmo di consumo (41.000ton/anno) la loro durata sarebbe di 88 anni, una cifra paragonabile a quella stimata per le risorse di combustibili fossili (220 anni per il carbone, 40 per il petrolio e 60 per il metano). Ma, grazie a estrapolazioni geologiche, si pensa che esistano ancora tra i 9,6 e i 12,1 milioni di tonnellate di uranio non ancora scoperto, il che permette di più che triplicare la loro durata.[30] Inoltre, qualora le tecnologie oggi in fase di studio diventassero commercialmente disponibili, si arriverebbe ad una durata stimata in ben 8.000 anni, praticamente infinita.[31]
La domanda di elettricità prevista dalla NEA (*Nuclear Energy Agency*) per il 2030 è di 18.000 TWh/anno, inclusi i 6.000TWh/anno dei PVS.[32] Se, per allora, la fonte nucleare fosse la sola disponibile, si dovrebbero estrarre ben 350.000 tonnellate/anno di uranio ed è facile vedere come, in poco tempo, si esaurirebbero le scorte. Ma è altrettanto facile prevedere che è assai improbabile che il contributo nucleare alla produzione di energia elettrica si avvicini al 100%.
In ogni caso, può essere utile sapere che è stata tecnicamente dimostrata la possibilità di estrarre dall'uranio molta più energia di quanta non sia estraibile dall'insieme delle riserve di petrolio, metano e carbone.[33] E già oggi la capacità di estrazione, supportata dagli *stock* accumulati in passato, è superiore alla domanda dei reattori esistenti.
Anche per quanto riguarda il ciclo del combustibile (conversione, arricchimento, fabbricazione) l'offerta è maggiore della domanda. In effetti, ciò è dovuto, oltre che alla già citata sovrastima della domanda di energia nucleare, anche al fatto che paesi diversi hanno scelto di sviluppare delle capacità proprie anche in questo campo.
In realtà, esistono varie politiche riguardo al combustibile irraggiato. Mentre USA, Canada e Svezia hanno deciso di smaltirlo immediatamente, gli altri paesi occidentali (ed il Giappone) hanno optato per il ritrattamento del carburante usato per ragioni sia tecniche, sia economiche e politiche.
Dal punto di vista strettamente economico, la decisione di effettuare il riprocessamento dipende dall'accesso diretto all'uranio, dal suo prezzo e dal costo dell'arricchimento, che determinano il

---

[30] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 11-48.
[31] Cfr.: Priddle R., *Energy and sustainable development*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 2-6.
[32] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.
[33] In particolare, posta l'ipotesi di usare reattori surgeneratori a plutonio, le sole riserve conosciute presenti nei paesi ad economia di mercato, equivarrebbero a 4.500 miliardi di tonnellate di carbone. Per capirne l'abbondanza, si tenga presente che le riserve accertate di carbone sono circa 700 miliardi di tonnellate e quelle di petrolio e metano arrivano solo a 200 miliardi di tonnellate equivalenti di carbone. Infine il consumo annuo attuale di energia equivale a circa 8 miliardi di tonnellate di carbone all'anno. Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.

valore dell'uranio e del plutonio recuperato. Ora, visto l'eccesso di offerta in questo mercato, tali motivazioni economiche perdono parte della loro valenza e, allo stato attuale delle cose, l'opzione del ritrattamento è più che altro la conseguenza di una politica di massima riduzione possibile delle scorie.

E proprio in tema di residui radioattivi, vale forse la pena di spendere qualche parola sui metodi di confinamento e smaltimento. L'industria nucleare viene, spesso, ingiustamente accusata di non avere le conoscenze tecniche necessarie a gestire i propri rifiuti, a causa del basso numero di installazioni di smaltimento. In realtà, qui il problema è di carattere socio-politico: troppo frequentemente l'opposizione della popolazione locale ha creato difficoltà anche alla semplice esplorazione geologica dei siti per determinarne l'adeguatezza o meno. Solo l'esempio di alcune soluzioni di confinamento in atto in USA, Canada, Spagna, Svezia e altrove, potrà in futuro risolvere la situazione.[34]

Dunque, l'avvenire dell'energia nucleare non si giocherà sulla rarità del combustibile, ma sui costi, sui rischi di incidenti e sull'indipendenza energetica di certi paesi. In realtà, altre fonti come il petrolio ed il carbone sono molto più limitate e possono essere molto più nocive: l'uranio rimane quindi, a lunghissimo termine, una delle grandi fonti di energia per le società industriali.

Un'altra delle questioni che si pone al settore nucleare è quella del plutonio. Esso deriva sia dai processi di ritrattamento del combustibile irraggiato, sia dal disarmo nucleare. Ci si ritrova così con un'ingente quantità di plutonio fissile a disposizione, il cui destino non è stato ancora deciso. Una delle possibilità più interessanti è l'utilizzo del combustibile MOX (*Mixed OXide)*, cioè a base di ossidi misti di uranio e plutonio, nei reattori termici e nei prototipi di reattori veloci. Si prevede, infatti, un sempre maggiore utilizzo di questi combustibili.

1.3.3 – I combustibili MOX

In effetti, una volta accumulata una quantità sufficiente di plutonio dal ritrattamento dell'uranio irraggiato, ogni centrale potrà introdurre un 30% di combustibili MOX nel proprio reattore, ottenendone dei chiari vantaggi economici proporzionali al crescere del prezzo dell'uranio e al diminuire del costo di fabbricazione dei combustibili MOX, senza peraltro porre problemi di sicurezza o di esercizio.[35]

In particolar modo, il loro impiego permette non solo di riutilizzare parte dell'uranio già acquistato ed usato (senza doverne così comprare di nuovo), ma anche di poter saltare il passaggio dell'arricchimento, sostituendo l'uranio-235 con il plutonio. Però, vi sono anche delle diseconomie

[34] Per una trattazione approfondita dei problemi legati allo smaltimento del combustibile usato si rimanda al cap.4., par. 4.2.2 e 4.2.3.

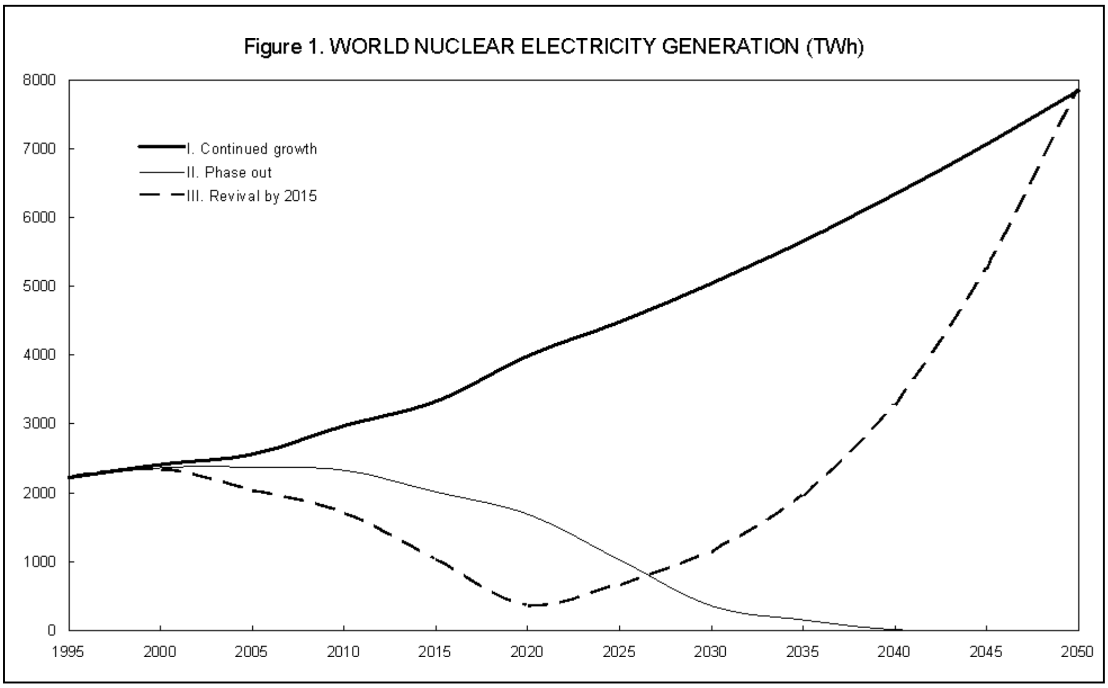
[35] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.

causate dal maggior costo (circa tre o quattro volte) di fabbricazione dei combustibili MOX e dalle ulteriori misure di confinamento dovute alla più forte radiotossicità del plutonio.
Affinché dunque il loro utilizzo diventi realmente competitivo è necessario che diminuisca il loro costo di fabbricazione, fino a diventare minore del costo di acquisto dell'uranio e del costo di arricchimento di quest'ultimo.
Un discorso ancora a parte è quello sul vantaggio o meno di costruire un impianto di ritrattamento. Questa possibilità dipende in modo diretto dal costo del plutonio estratto in un impianto già esistente, ma allo stato attuale delle cose, non sembra una soluzione redditizia.

1.3.4 – Il futuro dell'energia nucleare.

Il futuro del settore nucleare rimane, al momento, piuttosto incerto, tanto che persino la *Nuclear Energy Agency* ha ipotizzato tre diversi scenari possibili di qui al 2050, in modo da tener conto anche dell'impegno a favore dell'ambiente che verrà richiesto all'industria energetica.[36]

Fig. 11 – Produzione mondiale di elettricità dal nucleare (in TWh).



Fonte: Stevens G.H., *Summary of remarks at Global' 97.* Sito Internet: http://www.nea.fr/html/ndd/scenarios/scenarios.html.

Lo scenario I prevede una continua espansione della produzione mondiale di energia nucleare, fino ad arrivare a coprire il 30% dell'energia totale prodotta nel 2050. Bisognerebbe chiaramente costruire nuovi impianti (per una potenza di almeno 35 GWe l'anno), trovare nuove riserve d'uranio

[36] Cfr.: Stevens G.H., *Summary of remarks at Global' 97.* Sito Internet: http://www.nea.fr/html/ndd/scenarios/scenarios.html. Mentre per un'analisi più estensiva dei rapporti tra l'energia nucleare e la questione ambientale, cfr.: OECD NEA, *Nuclear power and climate change*. Sito Internet: http://www.nea.fr/html/ndd/climate/climate.pdf

e aumentare il riprocessamento del combustibile già utilizzato, e, infine, risolvere in modo sicuro il problema dello smaltimento delle scorie. D'altra parte, si arriverebbe ad evitare l'emissione di ben 3.200 milioni di tonnellate l'anno (3.200 Mton/anno) nel 2020 e di 6.300 Mton/anno nel 2050 di anidride carbonica.
Lo scenario II immagina, invece, che tutti i reattori nucleari vengano smantellati al termine dei loro 40 anni di vita. In questo caso, la produzione di elettricità dal nucleare verrebbe probabilmente sostituita, tra il 2025 e il 2050, per metà da nuove tecnologie a carbone "pulito" e per la restante metà dal gas naturale. Vi sarebbe quindi un forte aumento della domanda mondiale di combustibili fossili, con un seguente aumento delle emissioni di gas-serra, al punto che si passerebbe dalle 1.350 Mton/anno evitate nel 2020 al non evitarle affatto nel 2050.
Infine, nello scenario III s'immagina che non vi siano nuovi ordini di costruzione di centrali nucleari fino al 2015, dopodiché si avrebbe una ripresa della domanda di generazione da energia nucleare fino ad arrivare, nel 2050, allo stesso punto dello scenario I. Anche in questo caso vi sarebbe la necessità di costruire nuovi impianti, ma – diversamente da quanto succedeva nello scenario I – questa volta le imprese si troverebbero davanti ad un aumento improvviso della domanda (dopo il 2015) e dovrebbero essere in grado di assicurare la costruzione di impianti per una potenza di almeno 75 GWe l'anno. Il ritardo nella crescita del nucleare permetterebbe anche di sviluppare tecnologie per il riutilizzo del combustibile usato e di trovare nuovi giacimenti di uranio. Infine, si eviterebbe in tal modo di produrre 300 Mton/anno di CO_2 entro il 2020 e ben 6.300 Mton/anno entro il 2050.

1.4 – Le fonti rinnovabili

Sicuramente, per non diminuire il ritmo della crescita economica mondiale, sarà necessario trovare delle nuove ed efficienti forme di energia. Ma "malgrado le nuove fonti di energia rinnovabile (come il Sole o il vento) abbiano un ruolo importante in questo contesto, esse da sole potrebbero non essere sufficienti a coprire tutti i nostri bisogni futuri" ha detto Rubbia, ed infatti "investire solo in fonti rinnovabili è un rischio".[37]
In effetti, le fonti rinnovabili, soprattutto quelle dal sole e dal vento, sono considerate del tutto pulite e a basso impatto ambientale. Ma, in realtà, tali convinzioni sono spesso basate su pregiudizi e scarsa informazione sullo stato attuale della loro applicabilità su larga scala.[38] E dunque pensare che esse possano, nell'immediato futuro, garantire buona parte del fabbisogno energetico è quantomeno azzardato.

---

[37] Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html, e Leonardi A., *Il mio nucleare pulito*, in "Galileonet", 5 dicembre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html
[38] Quest'argomento verrà discusso in modo approfondito nel cap. 4, par. 4.3.

A riprova di quanto detto vi è il fatto che è molto difficile trovare dati precisi ed aggiornati sulla produzione di elettricità dalle rinnovabili e ancor di più sui suoi costi. In effetti persino la banca dati dell'*International Energy Agency* non solo non riporta i costi di produzione, ma addirittura le quantità di energia elettrica prodotte da queste fonti sono incomplete e riferite al 1990, segno che nonostante le grandi speranze esse non si dimostrano ancora competitive.

Tab. 3 – Produzione totale di elettricità da parte del settore pubblico nel 1990 e contributi delle fonti rinnovabili (in MW).

	Totale di cui	Idrica	Geotermia	Solare	Maree	Eolica
Belgio	13.395	1.401	n. p.	n. p.	n. p.	4
Canada	98010	55.091	n. p.	n. p.	20	n. p.
Danimarca	8.977	10	n. p.	n. p.	n. p.	343
Finlandia	11.441	2.621	n. p.	n. p.	n. p.	n. p.
Francia	95.179	23.027	n. p.	n. p.	240	n. p.
Germania	84.200	6.310	n. p.	n. p.	n. p.	2
Italia	49.130	17.039	496	n. p.	n. p.	n. p.
Olanda	15.309	36	n. p.	n. p.	n. p.	46
Regno Unito	69.323	4.089	n. p.	n. p.	n. p.	6
Spagna	42.094	15.657	n. p.	n. p.	n. p.	n. p.
USA	690.465	90.885	1.614	3	n. p.	n. p.

Fonte: nostra elaborazione sui dati tratti dal *database* dell'IEA. Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/db/f_elcap.htm.

Ad ogni modo, secondo i dati del 1990, le fonti rinnovabili coprivano già il 17,7% (pari a 1.559 Mtep) del fabbisogno energetico mondiale (8.800 Mtep), sebbene in realtà meno del 2% provenisse dalle "nuove rinnovabili" – e cioè solare, eolico , maree, mini-idraulico e impiego moderno delle biomasse – visto che la copertura delle grandi centrali idroelettriche era di 465 Mtep e quella della biomassa tradizionale di 930 Mtep.[39] Ora, le ipotesi di sviluppo delle nuove energie variano molto a seconda delle premesse su cui poggiano, si parla così di uno scenario delle politiche attuali e di uno scenario guidato ecologicamente. Nel primo si estrapola dalla situazione odierna, prevedendo un continuo ma limitato sviluppo delle rinnovabili, che arriverebbe nel 2020 a coprire il 21% del fabbisogno mondiale (15.000 Mtep), di cui soltanto il 4% proverrebbe da eolico, solare, ecc. e dunque il loro contributo non sarebbe molto significativo. Nel secondo scenario, invece, si immagina che l'importanza di queste energie venga meglio compresa e perseguita, di modo che esse possano

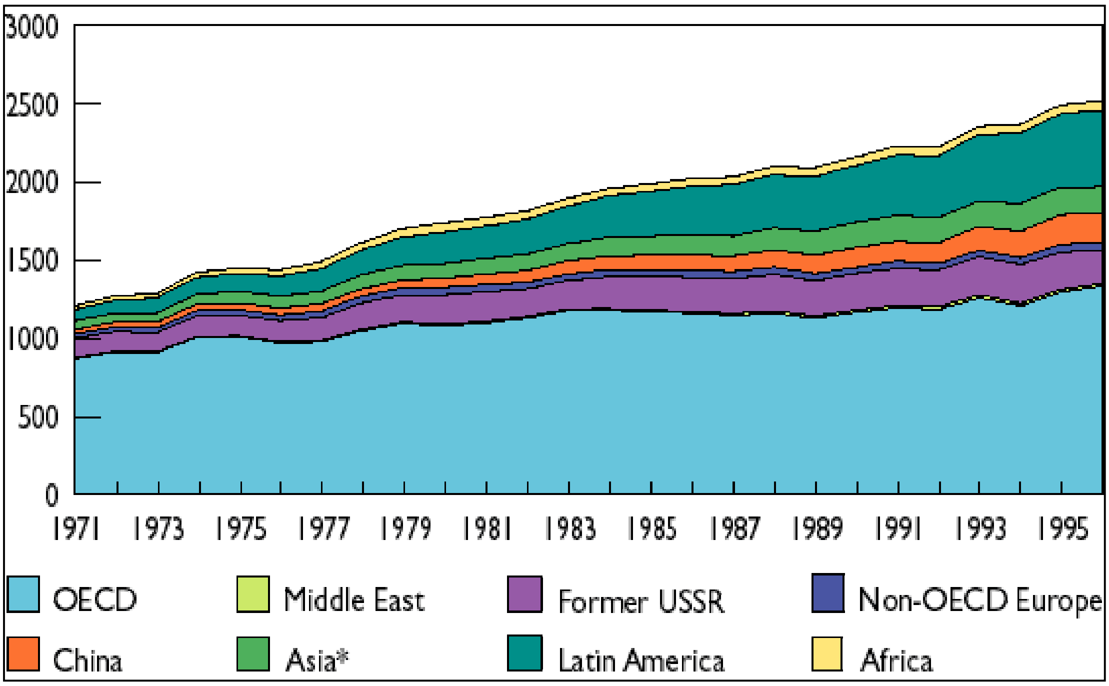
[39] Cfr.: Garozzo M., *Le nuove fonti rinnovabili di energia*, in "Energie pulite", "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 2-11.

arrivare a coprire circa il 30% della domanda mondiale di energia (in questo caso 11.000 Mtep), con la differenza che qui circa il 12% del totale sarebbe prodotto dalle nuove rinnovabili.[40]
In ogni caso, il discorso sulle energie rinnovabili necessita di essere diviso in due sottoargomenti, da una parte l'energia idroelettrica e, dall'altra, l'energia eolica, solare, dalle biomasse e dalle maree.

1.4.1 – L'idroelettricità.

Per quanto riguarda l'energia idroelettrica, essa è l'unica fonte rinnovabile attualmente utilizzata in modo estensivo. Essa ricopre circa il 16% (1995) della produzione di elettricità nei paesi OCSE, ma secondo la *Federal Energy Regulatory Commission*[41], il suo utilizzo potrebbe essere raddoppiato negli USA – e altrove nel mondo industrializzato – sia attraverso la modernizzazione e l'espansione dei siti esistenti, sia attraverso la creazione di nuovi siti. Nei PVS poi, il potenziale dell'idroelettricità è ancora maggiore. L'unico vero inconveniente di questa forma di energia è l'inevitabile impatto ambientale delle dighe e delle deviazioni dei fiumi.

Fig. 12 – Produzione di energia idroelettrica tra il 1971 e il 1996 (in TWh).



Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Ad ogni modo, vista l'accresciuta domanda di energia a livello mondiale, anche la produzione di idroelettricità è cresciuta nel periodo 1971 – 1996, passando da 1.285 TWh a 2.517 TWh. Ma durante questo periodo si è modificata la produzione per aree geografiche dell'energia idrica, per cui la diminuzione nell'utilizzo di questa fonte energetica nei paesi OCSE (passata dal 70,9% della quota

---

[40] Per un'analisi del potenziale di queste fonti e del loro contributo previsto alla produzione di elettricità nel 2020 si rimanda all'appendice, par. A. 13.
[41] Cfr.: Parks G.T., *Nuclear engineering and the future of electricity generation*. Sito Internet: http://www.newscientist.com/nsplus/insight/future/parks.html.old

mondiale al 53,0%) è stata in buona parte bilanciata dall'accresciuto sfruttamento nell'America Latina (dal 7,3% del 1973 al 19,4% del 1996) e dalla Cina (dal 3,0% al 7,5%).
I maggiori produttori di energia idroelettrica sono il Canada, gli Stati Uniti, la Cina, la Russia e la Norvegia. E proprio la Norvegia è il paese che vi fa maggior affidamento, infatti l'idroelettricità copre ben il 99,2% della produzione interna di energia elettrica. Altri paesi che contano in buona misura sull'energia idrica sono il Canada (62,4%), la Russia (18,2%), la Cina (17,4%) e, prima tra le nazioni europee, la Francia (12,8%), che è anche l'unico paese europeo che si colloca tra i primi dieci produttori mondiali, con una produzione di 65 TWh.[42]

1.4.2 – Le "nuove" rinnovabili.

Per quanto riguarda le altre fonti rinnovabili, i principali argomenti comuni a tutte sono: 1) la loro attuale non competitività economica rispetto alle forme di energia più convenzionali e 2) la loro incapacità, dal punto di vista fisico, a soddisfare le attuali e attese richieste di energia. Inoltre, le stime di costo sulle fonti rinnovabili che si trovano normalmente in letteratura sono molto scarse e non sempre prodotte da esercenti elettrici, che utilizzino le stesse metodologie di base e le stesse ipotesi impiegate negli studi relativi ai costi di produzione dell'elettricità dal nucleare o dal carbone. Questo fatto non permette di portare avanti dei paragoni esatti tra queste sorgenti di energia e le altre più classiche. Ad ogni modo, posto che le loro caratteristiche economiche dipendono dalle località geografiche, dalle condizioni climatiche e dal sito di produzione, si può comunque procedere ad una valutazione di massima.

1.4.3 – L'energia eolica

Per quanto riguarda l'energia eolica[43], essa non mostra, per adesso, vantaggi competitivi rispetto agli impianti nucleari o a fonti fossili, né sembra possibile per il prossimo futuro un miglioramento della sua posizione economica, a meno di forti incentivi in suo favore. Comunque, la costruzione di centrali eoliche può essere giustificabile in siti particolarmente isolati, non riforniti in modo sufficiente dagli impianti centrali, aventi, però, le caratteristiche climatiche necessarie. Inoltre, un aumento nel numero di impianti eolici prodotti porterebbe, come è naturale, ad una diminuzione del loro costo. Al momento, comunque, la potenza massima di un simile sistema è di circa 70 kW e dunque lo sfruttamento di questa fonte energetica è poco consigliabile per zone praticamente prive di vento, come l'Italia, mentre per paesi come la Danimarca la situazione è talmente favorevole da poter

---

[42] Cfr.: IEA, *Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition* . Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm
[43] Per una spiegazione del funzionamento degli impianti eolici si rimanda all'appendice, par. A.9.

arrivare a produrre circa il 4,7% della propria energia dal vento. La capacità di generazione di energia eolica è stata stimata essere attorno ai 7,469 MW alla fine del 1997.[44]

Entrando maggiormente nei particolari, per l'energia eolica si ha che il suo sfruttamento: 1) è fortemente soggetto alle caratteristiche climatiche e ambientali di ogni regione; 2) dipende direttamente dal tempo meteorologico e, dunque, non può essere costante, se non nel brevissimo periodo; 3) presenta come principali svantaggi i problemi di rumore e di impatto estetico del gran numero di turbine necessarie a produrre quantità accettabili di elettricità. Come parziale risoluzione a questi inconvenienti è stata avanzata la proposta di installare le "fattorie del vento" in mare, al largo[45], ma ciò provocherebbe un forte aumento nei costi a causa della costruzione delle fondamenta, della necessità di proteggerle dalla corrosione del sale e del trasporto dell'energia prodotta. Resta comunque vero che l'uso dell'energia eolica è oggi caratterizzato da un *trend* positivo e da un incentivo al suo aumento.

1.4.4 – L'energia solare

L'energia che ci viene dal Sole, è abbondante e più che sufficiente a soddisfare i bisogni presenti e futuri dell'umanità. Ma la difficoltà del suo utilizzo è dovuta al fatto che arriva sulla Terra in forma diffusa e non concentrata. In ogni caso, il modo migliore per trasformarla in energia utile è l'uso delle celle fotovoltaiche.

Le celle fotovoltaiche sono pannelli di materiale semiconduttore che, irradiati di luce solare, la convertono direttamente in corrente elettrica continua a basso voltaggio. L'efficienza di queste celle dipende, per lo più, da fattori ambientali: nuvolosità, nebbia, altezza del sole nel cielo, periodo dell'anno. Attualmente il costo medio di un kWh prodotto dalle celle fotovoltaiche è più del doppio di quello prodotto con metodi convenzionali. [46]

L'utilizzo privilegiato dell'energia solare è sicuramente quello domestico – data la piccola dimensione dei pannelli fotovoltaici, che potrebbero facilmente fornire un'abitazione privata delle quantità di energia necessaria al fabbisogno familiare, visto che la potenza generata è di 1 kW per metro quadrato investito dai raggi solari – ma vi è anche la possibilità, previ necessari sviluppi tecnologici, di creare delle vere e proprie "centrali solari". In questo ambito sono numerosi i progetti europei che tendono ad accrescere l'uso di questa fonte energetica, sebbene siano fortemente in disaccordo le opinioni riguardo alla stima realistica di un loro possibile contributo alla generazione di elettricità.

---

[44] Cfr.: Moretti P.M., Divone L.V., *Le macchine eoliche*, in "Energie pulite", "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 54-59.

[45] Si tratta delle cosiddette centrali eoliche *off-shore*.

[46] Le celle fotovoltaiche hanno indubbi vantaggi: non hanno parti in movimento, non provocano emissioni né rumore, la ricerca sta portando ad una loro efficienza sempre maggiore e sempre più a basso costo. Cfr.: Massaglia S., *Dal Sole l'energia del prossimo secolo*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", n. 854, 30 gennaio 1998.

. Da parte sua, l'Italia, che per la sua posizione geografica potrebbe, al limite, produrre energia elettrica solare sufficiente per 30 milioni di famiglie, ha da poco varato il progetto "Diecimila tetti fotovoltaici", che distribuirà in cinque anni ben 500 miliardi in incentivi vari, e che ci permetterà di raggiungere gli altri paesi europei (ad esempio nel 1997 in Germania sono stati installati 300.000 metri quadri di pannelli, contro i 5.000 installati nella ben più assolata Italia).[47]

In ogni caso, si può affermare che, se la diminuzione dei costi attualmente in atto continuerà, le celle fotovoltaiche diventeranno piuttosto comuni nei prossimi 25-50 anni, soprattutto per la produzione privata di elettricità.

1.4.5 – La bioenergia

Infine, abbiamo la bioenergia, cioè la produzione di elettricità dalle biomasse (residui agricoli e raccolti cresciuti apposta). Essa rappresenta attualmente "la seconda maggiore risorsa di energia rinnovabile negli USA" [48], allo stesso tempo però, ha un costo di produzione di elettricità notevolmente più alto rispetto alle fonti tradizionali e dunque, nonostante le buone prospettive di diminuzione dei costi, essa non si presenta come una valida alternativa energetica.

Per le altre fonti rinnovabili (cioè energia dai rifiuti e dalle onde), invece, non si hanno finora dati di un loro utilizzo commerciale. Ciò significa che il loro uso, almeno a breve termine, sarà limitato e di tipo sperimentale, ed incontrerà difficoltà di carattere logistico e ambientale.[49]

Riassumendo, le tecnologie dell'energia rinnovabile non si sono dimostrate competitive in alcuna nazione, se paragonate all'energia nucleare, da gas e da carbone, essendo economicamente ostacolate dalle grandi dimensioni degli impianti, dalla scarsa potenza e dalla loro tecnologia ancora immatura rispetto alle altre forme di generazione elettrica. Esse, infatti, presentano ancora un costo per chilowattora superiore a quello di una centrale elettrica tradizionale; inoltre, anche immaginando un loro utilizzo estensivo, costi addizionali si avrebbero dalla riconversione, nel settore energetico, di macchinari e infrastrutture. Infine, la scelta di investire in fonti alternative è profondamente legata ai costi per estrarre energia dalle fonti tradizionali, in particolar modo, se il prezzo del petrolio è basso, diventa difficile che le altre tecnologie si presentino competitive.[50]

---

[47] Cfr.: Ravizza V., *L'Italia scopre il solare*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", 24 febbraio 1999.

[48] Cfr.: Parks G.T., *Nuclear engineering and the future of electricity generation*. Sito Internet: http://www.newscientist.com/nsplus/insight/future/parks.html.old

[49] Per una breve descrizione delle altre forme di energie rinnovabili si rimanda all'appendice, par. A.10, A.11 e A.12.

[50] Proprio questo è uno delle ragioni principali che motivano l'idea di molti governi di introdurre delle tasse sui combustibili più inquinanti, come per esempio riguardo al carbone e alla *carbon-tax*. Cfr.: Giuliani A., *Quanto costa l'inquinamento. Intervista a Edgardo Curcio*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

Insomma, come è stato detto, "per una serie di ragioni economiche, strategiche e ambientali, è poco probabile che le energie rinnovabili diventeranno mai i soli mezzi di produzione di energia elettrica, ma esse diventeranno comunque sempre più importanti".[51]

Ad ogni modo, come si evince dal Libro Verde, la Commissione Europea ritiene che, essendo le fonti rinnovabili in un momento critico del loro sviluppo, sia necessario un notevole sforzo politico per permetterne la diffusione e passare così dal 6 al 12% dello *share* di elettricità prodotta. In generale, viene vista con fiducia la biomassa – residui vegetali, biocombustibili e rifiuti – che sembra essere la principale fonte rinnovabile capace di ovviare alla stagnazione dell'energia idroelettrica. Inoltre, è stato calcolato che l'uso di queste fonti alternative avrebbe un'incidenza sull'occupazione cinque volte maggiore rispetto a quella di un ulteriore sfruttamento dei combustibili fossili, e, a seconda dei modelli usati, si parla di 476.000 o 500.000 nuovi posti di lavoro (contro i 72.000 delle fonti tradizionali) nella sola Unione Europea.[52]

Resta sottinteso che la valutazione della competitività delle varie fonti dovrebbe ormai includere l'internalizzazione delle diseconomie esterne, in particolare quelle derivanti dagli effetti diretti e indiretti a salute, ambiente e occupazione.

1.5 – La ricerca di fonti alternative

È stato detto che "è irresponsabile rifiutare di impegnarsi nello studio di soluzioni per questo [l'esaurimento delle fonti fossili, N.d.A.] che è un problema cruciale per l'avvenire della nostra società, e solo per paura di trovarsi domani a dover prendere delle decisioni. [… Ci sono] problemi che persistono e che chiedono ancora una soluzione. Si tratta di una malafede che confina con l'oscurantismo culturale e la cui gravità può sfuggire all'evidenza. Ma è solo perché siamo ancora lontani (?) dal momento in cui sarà realmente doloroso il prezzo sociale da pagare, se continueremo a non avere (non cercare?) soluzioni alternative per la produzione di energia".[53]

L'unica possibilità è di cominciare per tempo ad incentivare la ricerca, onde evitare di trovarsi impreparati di fronte all'esaurimento dei combustibili fossili, cosa che comporterebbe un ritardo fatale e distruttivo nei confronti dell'ordinata transizione del sistema energetico verso fonti alternative.

Ed infatti la ricerca scientifica è già iniziata.

---

[51] Cfr.: Parks G.T., Nuclear engineering and the future of electricity generation, op. cit.

[52] Caccia Dominioni F., *Discorso del Dott. Fabrizio Caccia Dominioni Direttore alla Commissione Europea,* Seconda conferenza per l'energia, Torino ottobre, 1997. Sito Internet: http://europa.eu.int/en/comm/dg17/s97004c.htm

[53] Cfr. Amati D., *L'ultima "trovata" di Rubbia*, in "Lettere triestine", gennaio 1996. Sito Internet: http://www.spin.it/lettere-triestine/rubbia.html

1.5.1- Le celle a combustibile, i reattori autofertilizzanti, gli ADS

Molta attenzione viene oggi riposta sulle celle a combustibile. Si tratta di una tecnologia che sfrutta il principio elettrochimico per il quale la combinazione di idrogeno ed ossigeno genera elettricità e che garantisce, potenzialmente, un funzionamento pulito, silenzioso ed efficiente, in grado di generare energia elettrica in modo decentrato, ovvero indipendente. Il loro utilizzo viene infatti proposto per impianti di produzione d'elettricità ad uso domestico, per alimentare oggetti elettronici portatili e, con maggiori difficoltà, per fornire energia ai mezzi di trasporto.[54]

A livello generale, possiamo dire che i principali ostacoli alle celle a combustibile per la generazione d'energia sono: 1) il problema della fonte di combustibile: o idrogeno liquido, che per essere mantenuto allo stato liquido richiede temperature prossime allo zero assoluto (-273,15 °C) o metanolo, che comporta, durante l'estrazione, una fase di conversione chimica piuttosto complicata e che richiede costosi catalizzatori al platino; 2) l'aggiunta di complessi sottosistemi per assicurare il loro funzionamento; 3) l'alto costo (tanto che un chilowatt prodotto da celle a combustibile costa 3-4 volte di più di quello prodotto da turbine alimentate a gas) e la breve vita operativa (al massimo 10 anni).

Tra i vantaggi, vi sono sicuramente la bassa quantità di emissioni nocive, la possibilità di estrarre l'ossigeno stesso dall'aria e l'idrogeno da una grande varietà di combustibili adatti, tanto rinnovabili (etanolo, metanolo, biomassa), quanto fossili (caso in cui però l'utilità di questa tecnologia diminuirebbe sicuramente) e, infine, la capacità di produrre energia elettrica in siti decentrati, visto che si calcola che nei prossimi anni almeno il 15-20% dell'elettricità prodotta sarà decentrata e si ritiene che le celle a combustibile possano coprirne fino a circa il 10%.

Grazie anche agli incentivi alla ricerca in questo settore, si stanno ottenendo impianti con una sempre maggiore efficienza, tanto che, secondo alcune fonti industriali negli Stati Uniti, le vendite di celle a combustibile per uso domestico potrebbero raggiungere i 50 miliardi di dollari entro il 2030.

I reattori autofertilizzanti sono stati oggetto di particolare enfasi soprattutto durante gli anni Settanta, quando il settore nucleare era pervaso da ottimistiche previsioni di sviluppo futuro. Sarebbe stato impossibile basare l'espansione di quest'industria, per un periodo superiore al secolo, senza utilizzare l'uranio 238, ossia il 99,3% dell'uranio naturale. Ecco dunque che la caratteristica vantaggiosa dei "reattori veloci" o "autofertilizzanti": essi non solo producono energia partendo dall'uranio 238, ma da esso riescono ad ottenere un altro combustibile nucleare, il plutonio 239, e sono in grado di utilizzare anche il plutonio proveniente dal disarmo.

---

[54] Per una semplice spiegazione tecnica delle celle a combustibile, cfr.: Lloyd, A. C. *Una centrale elettrica in cantina,* in "Le Scienze", n. 373, settembre 1999, pp. 92-97 e Appleby A.J., *Il futuro delle celle a combustibile*, in "Le Scienze", n. 373, settembre 1999, pp. 84-91.

Nello stesso periodo le due crisi petrolifere, nel 1973/74 e nel 1979, contribuirono a rafforzare la posizione del settore nucleare, viste le minacce che pesavano sugli approvvigionamenti di petrolio.
Ma poi, la situazione cambiò: l'aumento dei prezzi del greggio presto sparì, le particolari misure di sicurezza - necessarie per i reattori veloci – richiesero l'introduzione di numerose complicazioni tecnologiche, le riserve di uranio si rivelarono più abbondanti di quanto previsto, lo stesso prezzo dell'uranio diminuì e, contemporaneamente, anche l'interesse per i reattori autofertilizzanti.
In ogni caso, un parco nucleare europeo caratterizzato dal trattamento spinto, tramite reattori a neutroni veloci (autofertilizzanti) e impianti speciali per trattare e produrre il combustibile, ridurrebbe di molto la radiotossicità finale delle scorie. Ora sebbene un simile parco sia alla portata economica e tecnologica dell'EU, non sarebbe facile vincere la resistenza dell'opinione pubblica.

Gli ADS (*Accelerator Driven System*) sono dei sistemi guidati da acceleratori di particelle che, sfruttando decenni di ricerca, permettono di eliminare le paure normalmente rivolte verso il settore nucleare (incidenti, scorie, proliferazione degli armamenti), ma nel frattempo di mantenere tutti i vantaggi che da esso derivano. In pratica si tratta di macchine che, attraverso l'acceleratore, sono in grado di trasmutare le scorie e, contemporaneamente, produrre energia.
In pratica, i nuovi sistemi di produzione di energia nucleare dovrebbero:
essere sottocritici e garantire in maniera deterministica (e non probabilistica) dalla fusione accidentale del nocciolo attraverso un autoraffreddamento spontaneo;
permettere di bruciare completamente gli elementi transuranici (parte delle scorie radioattive) utilizzando neutroni sufficientemente veloci;
infine, utilizzare con efficienza un combustibile abbondante in natura in modo da garantirne l'illimitatezza delle riserve.
Dunque, come dice Rubbia: " Dobbiamo cancellare dalla lista delle paure popolari tre parole: (1) Hiroshima, (2) Chernobyl, (3) Deposito Geologico".[55] Ed è proprio questo ciò che gli ADS si propongono di fare.
Negli ADS il principale vantaggio è la loro caratteristica di sistemi sottocritici, eliminando così la possibilità fisica di incidenti di criticità (poiché, essendo la fonte di neutroni esterna al reattore, non è necessario partire con un carico di combustibile sovracritico e neppure necessariamente fissile). Inoltre, se la sorgente neutronica è sufficientemente energetica, essi permettono la trasmutazione dei prodotti di fissione, eliminando così di fatto i principali svantaggi dell'energia nucleare come la

[55] Per un confronto approfondito tra gli impianti nucleari esistenti e le caratteristiche auspicabili dei nuovi sistemi e per un paragone tra due possibili forme di energia nucleare pulita, l'*Energy Amplifier* e la fusione, cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

conosciamo oggi.[56] Si pensi, infatti, che secondo alcune stime entro il 2015 ci saranno circa 70.000 tonnellate di combustibile nucleare usato e circa 2.500 tonnellate di plutonio, al mondo.

Nel mondo sono allo studio vari progetti di ADS (tab.4), i principali sono l'*Energy Amplifier* di Rubbia, l'*Omega* in Giappone e l'*APT* negli Stati Uniti., ma il progetto più avanzato è sicuramente l'EA. In tutti e tre i casi, vi è comunque la necessità di costruire, dopo il prototipo in scala ridotta, un impianto di prova a scala naturale, il cui costo sarà probabilmente oltre il miliardo di dollari. Ma, nonostante i rischi finanziari che ciò comporta, un successo di questa tecnologia permetterebbe di migliorare il giudizio dell'opinione pubblica sull'energia nucleare, permettendo così di assicurare al mondo una produzione di energia su ampia scala, a lungo termine e capace anche di ridurre le emissioni di gas-serra.[57]

Tra le caratteristiche comuni a tutti e tre i programmi di ricerca ci sono:

- il fatto di non richiedere lo sviluppo di acceleratori particolarmente innovativi per il prototipo, potendo usare quelli già esistenti, purché opportunamente modificati;
- l'importante aspetto che la reazione di fissione nucleare è sottocritica, cioè necessita di un continuo rifornimento di neutroni dall'acceleratore, contrariamente a quella dei normali reattori che invece si autosostiene. Ciò significa che disastri come Chernobyl non si possano verificare, infatti, se l'acceleratore si ferma anche la reazione si ferma.

Rispetto ai progetti in fase di studio a Los Alamos ed in Giappone, invece, la proposta di Rubbia ha su di essi i vantaggi di:

- non aver bisogno di una tecnologia estremamente innovativa come quella necessaria per usare combustibile fluido, in quanto potrebbe utilizzare barre di combustibile simili a quelle dei normali reattori;
- suggerire l'utilizzo del torio come combustibile: in effetti, il torio in sé non è fissile, ma sotto bombardamento neutronico esso viene trasformato in uranio 233, altamente fissile. La fissione cede neutroni, i quali mantengono la catena di fissione e, in più, rigenerano uranio 233 dal torio (cosa impraticabile in un normale reattore termico, dove il numero dei neutroni è troppo basso).

---

[56] Cfr. Anonimo, *Accelerator Driven Systems – An introduction*, KTH. Sito Internet: http://www.neutron.kth.se/transmutation/introduction

[57] Per una descrizione dei progetti Omega e APT, cfr.: Boldeman J.W., *Accelerator driven nuclear energy systems*, in Atti dell'*Academy Symposium*, ATSE, November 1997. Sito Internet: http://www.atse.org.au/publications/symposia/proc-1997p11.htm

Tab. 4 – Paragone tra vari tipi di ADS proposti.

Facility	Energy Amplifier	OMEGA	APT
Location	CERN ?	Japan	Savannah River
Organisation	Rubbia- CERN	JAERI	LANL
Beam Energy	1.0 (2.7) GeV	1.5 GeV	1.3 GeV
Beam Power	30 MW	60 MW	130 MW
Accelerator			
Injector	Cyclotron/Linac	Drift Tube Linac	Drift Tube Linac
Final Acc	Super-Conducting Linac	High Beta Super-Conducting Linac	Coupled Cavity Linacs /Super Cond. Linac
Target	Liquid Lead	Tungsten	Extended Tungsten
Fuel	ThO_2 +0.1 ^{233}U	(a) Np - 15Pu - 30Zr AmCu - 35Pu - 10Y (b) 64NaCl - 5$PuCl_3$ - 31$MACl_3$	-
k eff.	0.95	0.89	-
Coolant	Liquid Lead	Liquid Sodium	Heavy Water
Coolant Temp	400° / 600°	330° / 430°	
Inlet / Outlet			
Blanket	Pb 3m		Pb (^3He flow through)
Total Power	1500 MW	820 MW	-
Electric Power	625 MW		
Reprocessing	Thorex/I		
Construction Time		Start 1997 Phase I 2003 Phase II 2007	1998 decision 2007 for production
Facility Cost*	≈ $1.3 B	≈ $1.3 B	≈ $2.3 B

Fonte: Boldeman J.W., *Accelerator driven nuclear energy systems,* in Atti dell'Academy Symposium, ATSE, November 1997. Sito Internet: http://www.atse.org.au/publications/symposia/proc-1997p11.htm

Secondo i calcoli, poi, la quantità di plutonio prodotta è piccolissima (tra un millesimo ed un decimillesimo) rispetto a quella dei reattori attuali, inoltre il torio è molto più abbondante del carbone nella crosta terrestre (oltre ad essere tre volte più comune dell'uranio) e viene interamente utilizzato nell'EA (al contrario dell'uranio naturale, che viene usato solo per lo 0,7% nei reattori).

Attualmente, anche l'Italia, si sta interessando agli ADS anche a livello di ENEA, e non più solo di singoli ricercatori o imprese, come dimostra la costituzione, in data 24/11/1998, dell'Unità di Progetto ADS, che ha il compito di sviluppare il contributo dell'ENEA al programma europeo sugli ADS. Per portare avanti questo progetto, all'ENEA sono già stati assegnati 4,6 miliardi dal MURST, altri 10 miliardi sono in arrivo e in più è atteso un contributo dalla Commissione Europea nell'ambito del Quinto Programma Quadro.[58]

Ma resta il problema dell'opinione pubblica italiana, che al solo sentir parlare di nucleare si irrigidisce in posizioni estremistiche. L'unico modo per convincerla è con i fatti: "Un'energica ricerca scientifica è meglio di tanta propaganda".[59]

Ed è proprio questo ciò che si propone il CERN.

[58] Cfr.: Anonimo, *Programma ADS* e *Risorse ADS*, ENEA. Sito Internet: http://www.enea.it
[59] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

1.5.2 – La struttura del CERN

Nell'Europa dei primi anni cinquanta, un gruppo di scienziati e politici sogna una nuova avventura per la scienza: un laboratorio scientifico europeo. Era chiaro che uno stabilimento scientifico di punta aveva bisogno di installazioni di una taglia e di una complessità tali da oltrepassare i mezzi dei singoli paesi. Nello stesso periodo l'Europa si univa, accogliendo nazioni che solo fino a pochi anni prima si erano fatte la guerra.

Il CERN, il laboratorio europeo della fisica delle particelle (l'acronimo proviene dal nome: *Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire*, ovvero centro europeo per la ricerca nucleare), nato nel 1954, è uno dei più grandi laboratori scientifici del mondo. Esso è situato sul confine franco-svizzero (112 ettari in Svizzera e 490 ettari in Francia), a ovest della città di Ginevra e costituisce un notevole esempio di cooperazione internazionale.

Il budget annuale del CERN (940 milioni di franchi svizzeri nel 1994) è finanziato principalmente dai 19 Stati europei membri - Germania (22,45%), Francia (16,52%), Regno Unito (16,01%), Italia (14,55%), Spagna (6,27%), Olanda (4,39%), Svizzera (3,37%), Belgio (3,10%), Svezia (2,70%), Austria (2,41%), Danimarca (1,79%), Norvegia (1,79%), Finlandia (1,31%), Portogallo (1,23%), Grecia (0,80%), Polonia (0,71%), Repubblica Ceca (0,27%), Ungheria (0,23%) e la Repubblica Slovacca (0,10%).

Il CERN ha come missione la scienza di base, più precisamente la fisica delle particelle. Per questo fine, esso utilizza la più grande macchina scientifica del mondo: il collisore elettroni-positroni LEP. Fasci di elettroni e fasci di positroni sono lanciati in senso opposto in un anello sotterraneo di 27 km a una velocità vicina a quella della luce e proiettati gli uni contro gli altri.

Per concepire e progettare le complicate macchine del CERN e assicurare il loro buon funzionamento, per aiutare nella preparazione, esecuzione, analisi e interpretazioni delle complesse esperienze scientifiche e per effettuare la moltitudine dei compiti necessari in un'organizzazione così grande e specializzata, il CERN impiega 3000 persone tra ingegneri, tecnici, artigiani, amministratori, segretarie, operai, ecc., ma in totale vi lavorano circa 8.000 persone provenienti da una quarantina di paesi.

Il CERN infatti attira migliaia di scienziati provenienti sia dagli stati membri che da altrove: USA, Canada, Giappone, Russia, Cina, Israele, India, ecc. Questi specialisti venuti da tutto il mondo forniscono un esempio stupefacente di collaborazione scientifica che trascende le differenze di ordine politico. I risultati ottenuti sono sempre disponibili e accessibili, permettendo così di diffondere le conoscenze e le competenze acquisite dal CERN all'interno dei laboratori nazionali e delle università. Il fine è di migliorare la nostra conoscenza del mondo attorno a noi e di meglio comprendere le leggi che reggono la natura: si tratta di scienza pura, senza obiettivi tecnologici o commerciali immediati.[60]

Non di meno, anche a breve termine, questa ricerca spinge la tecnologia ai limiti del possibile per le sue esigenze estreme di precisione e di rapidità di risposta; essa diventa così un catalizzatore per l'innovazione tecnologica e permette delle ricadute importanti in altri settori. Delle nuove tecniche vedono la luce: gli *scanner* per la diagnosi medica, i traccianti radioattivi, l'innesto ionico, la datazione al carbonio radioattivo, il *Web*, ecc. A più lunga scadenza, queste nuove conoscenze potranno sboccare in progressi tecnologici e inimmaginabili benefici per l'umanità.

Il CERN permette di porre in relazione la scienza e la tecnologia, così come la costante ricerca di nuove idee e la loro messa in pratica. I lavori effettuati al CERN stimolano anche l'industria: un'inchiesta ha mostrato che i contratti che le aziende ottengono dal CERN danno luogo a numerosi franchi svizzeri di nuovi affari per ogni franco svizzero ricevuto dal CERN.[61]

1.5.3 – Il progetto dell'*Energy Amplifier* e la sua storia

Il progetto nasce dalla passione di vecchia data di Carlo Rubbia, vincitore del Nobel per la fisica nel 1984, di cercare nuove fonti di energia nucleare, sfruttando le conoscenze della fisica delle alte energie[62]. Partito inizialmente dall'idea di usare gli ioni pesanti per indurre fusioni termonucleari controllate, nei primi anni '90, incominciò invece a pensare ad una via alternativa di produzione d'energia attraverso fissioni (= scissioni) nucleari controllate.

La concezione di base è quella di usare un acceleratore di particelle, producendo neutroni per *spallazione* (interazione di particelle con un bersaglio), per alimentare un sistema combustibile-moderatore in cui i neutroni si moltiplicano per reazioni di fissione a catena. Come avremo modo di vedere, il nome di *Energy Amplifier* (EA), cioè di Amplificatore d'Energia, deriva dalla capacità di questo sistema di ottenere un guadagno netto di energia.

1.5.4 – Presentazione dell'*Energy Amplifier*

L'idea dell'EA è stata ufficialmente presentata per la prima volta da Carlo Rubbia il 24 novembre 1993 durante un seminario al CERN. Il sistema si basa su delle ben note leggi fisiche e su una serie di trasmutazioni nucleari indotte dalla presenza di neutroni veloci.

Le premesse su cui poggia sono che vi sia l'utilizzo <u>totale</u> del combustibile naturale iniziale e che le sue riserve siano pressoché illimitate, che il sistema sia sottocritico, che non esista il pericolo di

---

[60] Cfr.: CERN, Le CERN: un example de coopération scientifique internationale, Publications CERN, Geneva Avril 1991.

[61] Per una breve descrizione delle ricadute economiche dell'attività del CERN, e della ricerca pura in generale, tanto a breve termine quanto nel lungo periodo si veda il cap. 5, par. 5.2.2 e 5.2.3.

[62] Anonimo, *The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand*, in "CERN Courier", vol.35, n. 3, maggio 1995, pag. 15-19.

fusione del nocciolo e che una frazione (il 5-10%) dell'energia elettrica prodotta venga utilizzata per far funzionare l'acceleratore.

L'EA è un nuovo concetto di fissione nucleare basato su un sistema sottocritico guidato da un acceleratore di particelle. Il sistema sottocritico viene mantenuto tale dall'apporto esterno di neutroni.

Un sistema di questo tipo ha due applicazioni principali:

- eliminazione delle scorie radioattive provenienti dalle centrali nucleari tradizionali
- produzione massiva di energia nucleare in modo intrinsecamente sicuro e con una produzione minore (e con vita media inferiore) di residui rispetto alle normali centrali nucleari.

Molto schematicamente, l'EA è costituito da tre elementi principali:

- l'acceleratore a tre stadi: avente un'energia di 1 GeV[63] e un'intensità di 12,5 Ampère;
- il bersaglio di spallazione: costituito da un bersaglio di piombo circondato da piombo liquido, che permette di generare spettri di neutroni[64] adatti alla trasmutazione;
- il nocciolo: in cui si genera il calore, a cui sono associati i macchinari necessari alla trasformazione di tale calore in elettricità (i generatori normalmente usati nei reattori nucleari), con l'innovazione del piombo liquido come refrigerante e del combustibile utilizzato.[65]

In pratica, l'acceleratore di particelle crea un fascio di protoni ad altissima velocità, che entra nel sistema attraverso un lungo canale e arriva contro un bersaglio di piombo liquido (che funziona da moderatore). Immerse nel piombo vi sono le barre di combustile, una serie di cilindri di acciaio ermeticamente chiusi, al cui interno è stato posto del torio[66]. Ogni protone urta contro un atomo di piombo del bersaglio, e produce per spallazione (= interazione di particelle, qui protoni, con un bersaglio) un'altra classe di particelle, i neutroni veloci, attraverso i quali si determina la produzione di energia. Ora, il moderatore (il piombo liquido) rallenta questi neutroni veloci, permettendo loro di raggiungere una velocità sufficientemente bassa per essere assorbiti (cattura neutronica) dagli atomi di torio. Il torio, reso instabile dalla presenza di un neutrone in più all'interno del suo nucleo, decade, cioè si trasforma in un altro elemento, il protoattinio che, decadendo a sua volta produce l'uranio-

[63] L'elettronvolt (eV) è un'unità che esprime l'energia acquistata da un elettrone, sotto vuoto, accelerato dal potenziale di un volt.

[64] Con il termine di "spettri di neutroni" ci si riferisce a dei neutroni aventi diverse energie.

[65] Cfr.: Anonimo, *El laboratorio*, LAESA. Sito Internet: http://www.laesa.com/labo2.html

[66] L'India sarebbe il paese che ci guadagnerebbe di più dall'uso estensivo dell'EA, viste le sue abbondanti riserve di torio. E in effetti, l'India ha già un piccolo reattore di ricerca che usa uranio 233 estratto dal torio; si tratta di un primo passo verso il ciclo del torio. Cfr.: Anonimo, *Accelerator-driven nuclear energy*, in "Nuclear Issues Briefing Paper 47", 1998. Sito Internet: http://www.uic.com.au/ nip47.htm

233, il vero e proprio combustibile nucleare.[67] Gli atomi di uranio-233, colpiti da un neutrone, attraverso la reazione di fissione, generano circa 200 MeV di energia, due o tre neutroni (i cosiddetti neutroni secondari che continueranno la reazione) e due frammenti di fissione (le scorie).

In questo processo, dunque, ad ogni trasformazione di un elemento in un altro, si ha un rilascio di energia che provoca un forte riscaldamento dei cilindri. Il calore così prodotto viene poi convogliato in un trasformatore che lo muta in energia elettrica, esattamente come capita in una normale centrale termica.[68]

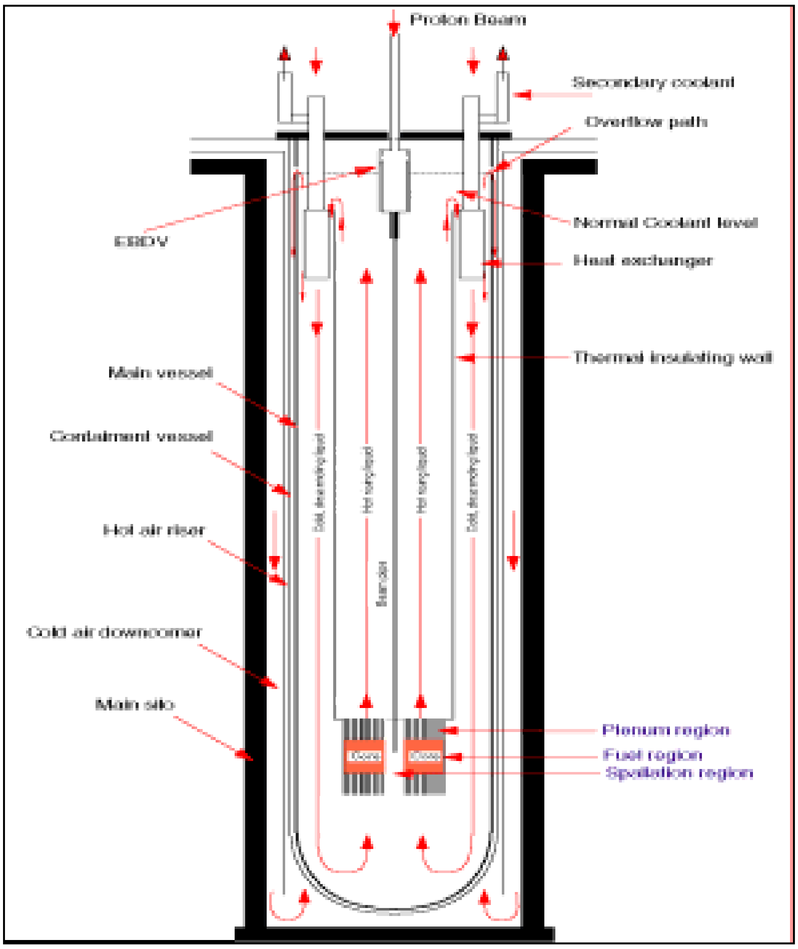
Ora, se in questo processo l'energia prodotta è maggiore (e nell'EA è tra le 50 e 100 volte maggiore) dell'energia usata per indurlo, allora avremo un guadagno netto di energia e, essendo proprio ciò che capita in questo caso, il sistema efficiente. Da qui il nome di *Energy Amplifier* (EA), o Amplificatore di energia. [69]

Il punto fondamentale, nell'EA, è che non si produce alcuna reazione nucleare senza i protoni immessi dall'acceleratore e, parimenti, non appena questi protoni smettono di arrivare la reazione si spegne.[70] Di qui la sicurezza intrinseca dell'EA, che rende fisicamente (nel senso di leggi della fisica nucleare) impossibili gli incidenti tipo Chernobyl o Three Mile Island e che proprio a questa sua incapacità di provocare una reazione nucleare auto-sostenuta deve la sua caratteristica di sistema sottocritico.

---

[67] Il protoattinio si trasforma in uranio 233 dapprima attraverso l'emissione di un raggio γ, poi attraverso un decadimento β e un elettrone. Un decadimento β è l'emissione da parte del nucleo atomico di un elettrone, poiché un neutrone decade in un protone ed in un elettrone. Un raggio γ è invece l'emissione di un fotone dal nucleo.
[68] Cfr.: Anonimo, *Preguntas mas frecuentes*, LAESA. Sito Internet: http://www.laesa.com/faq.html
[69] Per spiegazioni maggiormente approfondite del funzionamento dell'EA si consultino: Klapisch R., *Vers une approche nouvelle de l'énergie nuclaéaire*. Contribution à la séance du 23 Mai 1997 du groupe de travail "Ethique de l'énergie: le devoir de recherche", CERN, Geneva 1997, (per gentile concessione del CERN); Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al., *Conceptual design of a fast neutron operated high power Energy Amplifier,* CERN/AT/95-44 (ET), CERN, Geneva 1995; Rubbia C. et al., *Interim report of the Technical Working Group on accelerator driven sub-critical system,* CERN, Geneva ottobre 1998, (per gentile concessione del CERN); Rubbia C., *Resonance enhanced neutron captures for element activation and waste transmutation*, CERN/LHC/97-04 (EET), CERN, Geneva 1997 e Anonimo, *The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand*, CERN Courier, vol.35, n.3, May 1995, pag. 15-19.
[70] Un esempio chiarificatore: "Come un interruttore, il fascio di protoni accende e spegne a piacere la fissione dei nuclei. Nessun rischio, quindi, che la reazione sfugga al controllo", in Bianucci P., *Rubbia: eccovi l'atomo pulito*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", 14 dicembre 1994.

Fig. 13 – Schema dell'Energy Amplifier.



Fonte: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.

1.5.5 – Alcune caratteristiche tecniche a favore dell'EA

Un primo argomento è che, sebbene sia necessaria ancora parecchia ricerca su alcuni particolari, non sembrano esserci impedimenti insormontabili alla costruzione di un *Energy Amplifier*. Infatti, l'acceleratore richiesto è una ragionevole estrapolazione di quelli già esistenti[71] e le barre di combustibile risultano molto simili a quelle dei normali reattori.

Un secondo argomento è che il calore prodotto dalla fissione viene eliminato dal nocciolo attraverso la circolazione naturale (convezione) del piombo fuso, fino ad un convertitore di calore nel circuito secondario. L'uso del piombo infatti comporta una serie di vantaggi rispetto all'utilizzo del sodio (usato come refrigerante negli altri reattori veloci) in termini di sicurezza: inerzia chimica, punto di ebollizione elevato, bassa tensione di vapore, densità elevata che facilita il raffreddamento per convezione.

---

[71] Contrariamente a quanto capita per altri progetti simili all'EA portati avanti in varie parti del mondo; progetti che però necessitano dello sviluppo di innovativi acceleratori lineari, mentre per l'EA di Rubbia è possibile modificare adeguatamente un buon numero di ciclotroni già esistenti in Europa (a Trieste, in Svizzera, ecc.). Cfr.: Anonimo, *The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand*, op. cit.

Altri vantaggi dell'EA derivano da una serie di dispositivi passivi di sicurezza: assenza di pompe (proprio grazie alla convezione naturale), evacuazione del calore per irraggiamento (in caso di perdita del raffreddamento secondario), arresto automatico in caso di rottura accidentale della finestra del fascio di protoni, ecc. Tutto ciò fa sì che l'*Energy Amplifier* si riveli un reattore altamente sicuro e con risparmi sui dispositivi di sicurezza, che è garantita dal naturale comportamento dei componenti.

Il piombo liquido (oltre ad essere il moderatore) costituisce anche il sistema refrigerante, che, attraverso la convezione naturale, trasferisce il calore generato nella parte più bassa del sistema agli scambiatori di calore, posti alla sua sommità. La temperatura di esercizio del sistema è di circa 600-700°C e, essendo maggiore di quella normalmente raggiunta nei PWR, permette una conversione dell'energia prodotta più efficiente.

Il combustibile, composto da torio e uranio 233 presenta diversi vantaggi: vi sono grandi depositi di torio in tutto il mondo, la radioattività residua nel processo di estrazione mineraria del torio è molto più bassa di quella relativa all'uranio e tutti gli isotopi di torio possono essere usati come combustibile, invece del 0,7% dell'uranio naturale. In pratica, poco più di 7.000 kg di torio, nell'EA, potrebbero generare la stessa energia di 29 tonnellate di uranio naturale in un normale PWR, che corrispondono all'energia generata da 1.000.000 di tonnellate di carbone. Dunque, l'EA richiede la manipolazione di solo 70 tonnellate all'anno di un minerale che contenga il 10% di torio, rispetto alle circa 100.000 necessarie per il funzionamento di un normale reattore ad uranio.[72] Inoltre, l'utilizzo del torio come combustibile ha il grande vantaggio di dar luogo alla creazione di una quantità trascurabile di plutonio ed altri elementi transuranici, soprattutto se paragonata a quella proveniente dai PWR.[73]

Ora, l'unico punto a sfavore dell'utilizzo del torio è la difficoltà della sua lavorazione.[74] Ma nell'EA il problema viene in gran parte eliminato grazie al fatto che il combustibile, una volta caricato, non verrebbe più toccato per i successivi cinque anni, permettendo comunque al sistema di operare ad una potenza pressoché costante per tutto questo arco di tempo. Inoltre, gli unici residui sarebbero quasi solo dei frammenti di fissione, i quali pur essendo fortemente radioattivi, esaurirebbero in gran parte la propria tossicità in tempi relativamente brevi. Sembra opportuno prendere come livello di riferimento della radiotossicità quello della combustione del carbone, i cui residui non necessitano chiaramente di alcuno stoccaggio geologico. In effetti, dopo un ragionevole periodo di raffreddamento, le scorie derivanti dall'EA presentano una radiotossicità minore o uguale a quella

---

[72] Cfr.: Boldeman J.W., *Accelerator driven nuclear energy systems*, in Atti dell'*Academy Symposium*, November 1997, ATSE. Sito Internet: http://www.atse.org.au/publications/symposia/proc-1997p11.htm

[73] Questo capita perché il torio ha un numero atomico più basso di quello dell'uranio.

[74] Cfr.: Boldeman J.W., Accelerator driven nuclear energy systems, op. cit.

delle ceneri di carbone, cosicché non è più necessario il loro deposito geologico.[75] Infatti, la radiotossicità delle sue scorie dopo 500 anni risulta già minore di quella delle ceneri di carbone.

Infatti, per quanto riguarda i transuranici – incluso il plutonio e gli attinidi minori – la loro eliminazione deriva dal fatto che possono essere usati come combustibile nell'*Energy Amplifier*. In tal modo vengono eliminate le scorie, estraendo contemporaneamente l'energia in esse immagazzinata ed ottenendone dunque un guadagno energetico.

L'eliminazione completa di una tonnellata di scorie – più o meno la produzione annua di nettunio, americio e curio della Francia – corrisponde alla produzione di 1 GW di energia termica in un periodo di 940 giorni.[76] Per i prodotti di fissione, invece, è possibile la loro trasmutazione in elementi stabili o comunque a vita media considerabilmente più corta attraverso la cattura neutronica.

In pratica, con questo impianto si otterrebbe il doppio risultato di produrre energia e trasmutare le scorie radioattive (si veda a questo riguardo il cap. 5, par. 5.1.3: Il caso spagnolo). Proprio per questo l'EA potrebbe anche essere usato, in combinazione agli attuali LWR, per smaltirne i rifiuti più pericolosi e, in generale, anche per bruciare gli eccessi di plutonio militare rimastici dalla guerra fredda, fornendo così una soluzione a due dei principali problemi dell'energia nucleare di oggi.[77]

Ora, tutte queste caratteristiche tecniche permettono all'EA di operare per cinque anni, ad una potenza pressoché costante, fino a dei tassi di combustione di 120-150 GW-giorno per tonnellata di combustibile; infine, diversamente dai reattori normali non è necessario un periodico riarrangiamento delle barre di combustibile, diminuendo notevolmente i costi di manutenzione e i rischi per il personale.

Proprio questo periodo di cinque anni costituisce un altro punto a favore dell'EA, e cioè il fatto di rendere assai difficile l'utilizzo del materiale fissile per scopi militari. Infatti, il controllo dell'intero sistema dell'EA è dato dall'acceleratore, dunque nei cinque anni di vita (durata del ciclo) del combustibile il contenitore del combustibile può essere sigillato e venire poi riaperto, per la manutenzione, alla presenza di una squadra di ispezione internazionale. Viene così allontanato lo spettro della proliferazione nucleare.

E come se ciò non fosse sufficiente, anche il ricondizionamento (cioè il trattamento per un riutilizzo) del combustibile bruciato impedisce l'uso dell'uranio estratto per scopi militari, infatti esso è reso inutilizzabile dalle forti radiazioni e dall'emissione di raggi γ .[78]

---

[75] Il tempo di raffreddamento è di circa 500 anni, ma dopo tale periodo i "rifiuti" dell'EA "sono enormemente più puliti ($5x10^{-5}$ per tossicità ingestiva dopo 500 anni) [di quelli derivanti dalle] generazioni attuali e future di LWR". Cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

[76] Rubbia C. et al., Interim report of the Technical Working Group on accelerator driven sub-critical system, CERN, Geneva ottobre 1998, (per gentile concessione del CERN).

[77] Per alcuni approfondimenti su varie caratteristiche tecniche dell'EA si rimanda all'appendice, par. A.15.

[78] Per maggiori dettagli riguardo al procedimento di ricondizionamento si cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.

Infine, la realizzazione dell'EA rappresenta un'estrapolazione abbastanza modesta delle tecnologie a nostra disposizione negli acceleratori di particelle e dei reattori nucleari e può quindi essere oggetto di previsioni sufficientemente precise.[79] Le simulazioni mostrano che un sistema, con le caratteristiche appena segnalate, permetterebbe un guadagno – tra l'energia emessa e quella utilizzata per sostenerlo – di circa 60, sufficiente per 600 MW di energia termica, e cioè per circa 200 MW d'energia elettrica.[80]

Riassumendo, dunque, l'EA:

- non presenta barriere tecnologiche particolarmente elevate;
- ha dei sistemi di sicurezza passivi e la reazione a catena al suo interno (trattandosi di un sistema sottocritico) si spegne non appena viene staccato l'acceleratore;
- sarebbe più economico, sicuramente avrebbe una più facile operabilità e potrebbe sostituire gli attuali impianti di generazione di energia nucleare (come vedremo nel cap.3);
- può eliminare definitivamente le scorie radioattive delle centrali nucleari ed il plutonio militare;
- non produce emissioni inquinanti.[81]

> "Se perderemo questa opportunità [di sostenere attivamente il progetto dell'EA, N.d.A.], rischiamo la paradossale situazione di andare a comperare domani all'estero una tecnologia pulita che potrebbe essere sviluppata in Italia, oggi".[82]

Infatti, sono attualmente allo studio progetti simili in varie parti del mondo, tra cui la Francia con la *French Atomic Energy Commission*, gli Stati Uniti con il *Department of Energy*, e il Giappone con il progetto Omega.[83]

Certo è necessaria ancora parecchia ricerca, come dimostra il fatto che alla messa a punto dell'EA stanno contribuendo anche l'ENEA e l'INFN, sotto l'approvazione del MURST, e in collaborazione con il CEA francese, il *Los Alamos National Laboratory* americano, il *Forschung zenter* di Karlsruhe e gli Istituti di Obninsk russi.[84]

Ma, parafrasando Charpak è l'ambizione del progetto di Rubbia a sollevare le maggiori critiche sui punti non ancora chiariti dell'EA.[85]

---

[79] Contrariamente al caso della fusione nucleare, la quale invece per essere realizzata richiederebbe delle tecnologie non ancora in nostro possesso e che quindi necessiterebbero di un grande di dispendio di tempo e denaro in R&S. A riguardo si vedano i paragoni tra le due forme di produzione di energia in Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.
[80] Cfr.: Anonimo, The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand, CERN Courier, vol.35, n.3, May 1995, pag. 15-19.
[81] Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, op. cit.
[82] Cfr.: Battiston R., *Il Nobel Rubbia fa il tifo per il torio*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", 1 dicembre 1993.
[83] Cfr.: Anonimo, *Accelerator-driven Nuclear Energy*, in "Nuclear Issues Briefing Paper 47", 1998. Sito Internet: http://www.uic.com.au/ nip47.htm
[84] Cfr.: Anonimo, *Obiettivo tematico 5: rifiuti radioattivi e sicurezza nucleare*, nella sezione Piano Annuale. Sito Internet: http://www.enea.it/
[85] Per una schema grafico dell'EA si consulti l'appendice A.15.

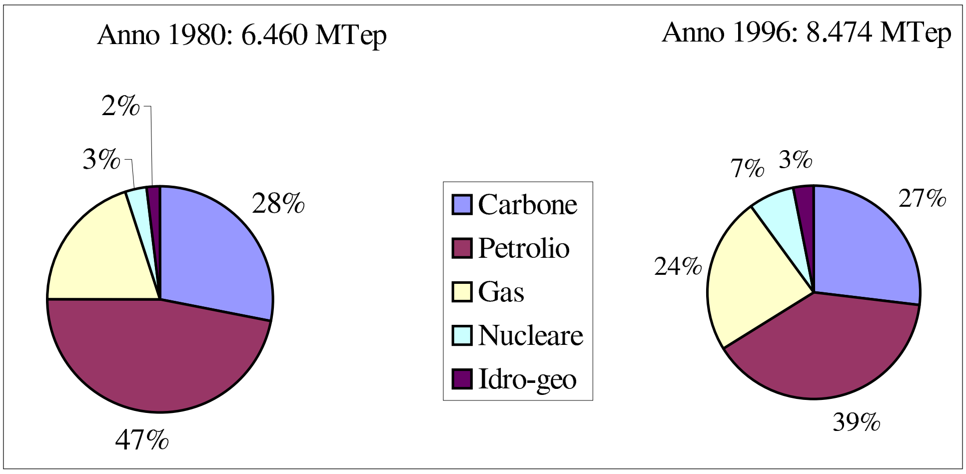
CAPITOLO 2
IL MERCATO DELL'ENERGIA ELETTRICA

2.1 – Il mercato dell'energia

La domanda mondiale di energia – articolata in consumo elettrico, trasporti, energia stazionaria (riscaldamento, ecc.) e generazione di energia elettrica– è cresciuta, tra il 1980 ed il 1996, in modo molto rapido da 6.460 Mtep a 8.474 Mtep, con un aumento di circa il 30% e con delle variazioni nella copertura di tale domanda da parte delle varie fonti di energia (si vedano il grafico e la tabella seguenti). In particolare è diminuito lo *share* di petrolio (dal 47 al 39%), mentre è aumentato quello del gas naturale (dal 20 al 24%) e del nucleare (dal 3 al 7%).

Tab. 5 e Fig. 14 – Copertura della domanda mondiale di energia.

Copertura della domanda (%)		
Fonte	**1980**	**1996**
Carbone	28%	27%
Petrolio	47%	39%
Gas	20%	24%
Nucleare	3%	7%
Idro-geo	2%	2%



Fonte: Curcio E., *Scenari energetici di medio e lungo periodo*, in Spezia, U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano, 1999, pp. 63-72.
.

Se questo è quanto capita a livello mondiale, resta comunque sottinteso che la struttura della domanda di energia per fonti primarie ha comunque delle forti differenze a seconda delle aree geografiche prese in considerazione. (tab.6)

Tab. 6 – Struttura della domanda di energia per fonti primarie nel 1995.

Struttura della domanda di energia per fonti primarie 1995					
	Carbone	Petrolio	Gas	Nucleare	Idro-geo
Europa occidentale	17%	44%	19%	12%	8%
Nord America	21%	39%	27%	7%	6%
Europa orientale	45%	25%	21%	5%	4%
Russia	20%	22%	48%	4%	6%
PVS	38%	40%	13%	1%	8%

Fonte: Curcio E., Scenari energetici di medio e lungo periodo, op. cit.

Tra il 1980 e il 1995, vi è stato

- un aumento dei consumi d'energia pari al 18,3% nei paesi OCSE;
- una diminuzione del 21,7% nelle economie in transizione (a causa della grave crisi economica);
- una crescita del 108% nei paesi non-OCSE dell'Asia;
- e, infine, un aumento del 43% in America Latina e del 61% in Africa.[86]

Si può poi aggiungere che i paesi con il più alto consumo energetico sono gli Stati Uniti e la Cina, ma mentre nel caso dei primi si può parlare di spreco energetico (gli americani hanno un consumo pro capite circa doppio rispetto a quello europeo), nel caso della Cina, invece, il consumo pro capite è bassissimo, ma a livello nazionale risulta enorme poiché deve essere moltiplicato per oltre un miliardo di persone.

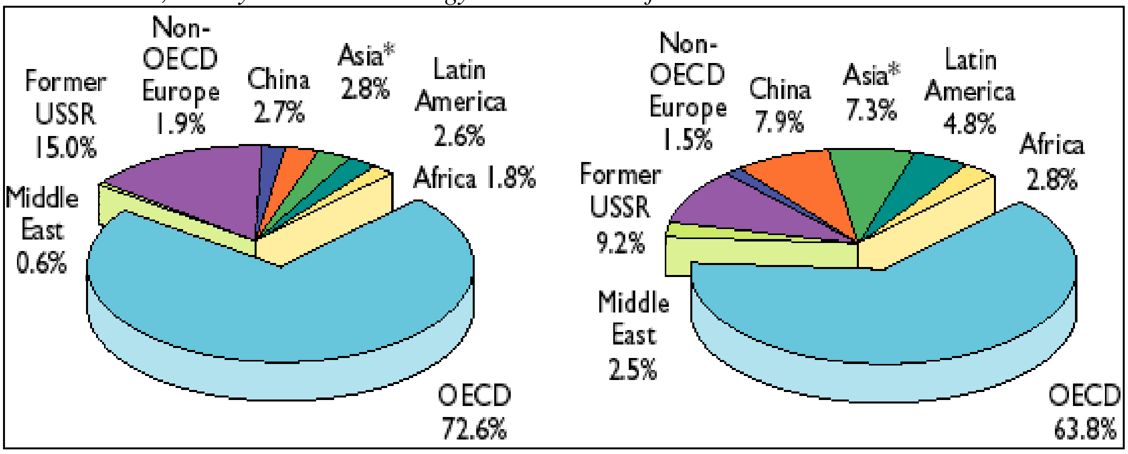
2.1.2 – Il mercato dell'energia elettrica

Ora, se questa è la situazione per il mercato energetico in generale, è interessante vedere come sia nettamente diversa la situazione del mercato dell'elettricità in particolare.
Infatti si noterà che la generazione di energia elettrica si è più che raddoppiata tra il 1973, in cui era pari a 6.118 TWh, ed il 1996, in cui sono stati prodotti 13.652 TWh. L'aspetto più innovativo è il notevole aumento dello *share* di elettricità mondiale prodotta dalla Cina, che è passata dal 2,7 al 7,9%, e dall'Asia, passata dal 2,8 al 7,3%. Invece, la riduzione avvenuta nella generazione di energia elettrica da parte dei paesi OCSE (passati da una quota del 72,6% ad una del 63,8%), è da ascriversi tanto ad un migliore sfruttamento dell'elettricità prodotta (una maggiore efficienza energetica), quanto ad una maggiore capacità delle altre zone del mondo di produrre da sole parte dell'energia di cui necessitano.

[86] Cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

Fig. 15 – Quote regionali della generazione di elettricità.

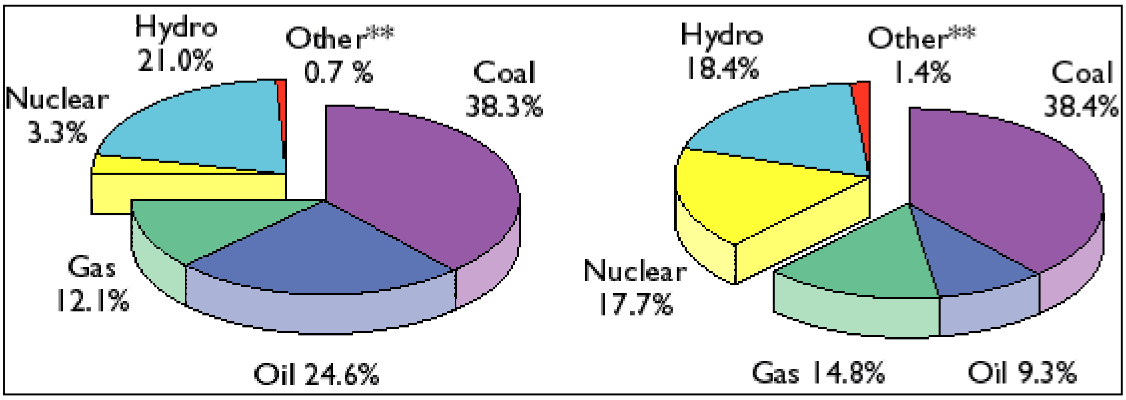
Fonte: IEA, *Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition*. Sito Internet:



http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm

Entrando maggiormente nel dettaglio, troviamo che i più grandi produttori di elettricità nel 1996 sono stati gli USA, che con una produzione di 3.652 TWh coprono da soli il 26,8% della produzione mondiale, seguiti da Cina (1.080 TWh), Giappone (1.003 TWh), Russia (846 TWh) e Canada (571 TWh). Per l'Europa, rispettivamente al sesto e settimo posto vi sono la Germania (551 TWh) e la Francia (508 TWh). Ma la situazione risulta ben diversa se si passa ad analizzare le esportazioni di elettricità. Al livello più alto si trova la Francia, che esporta ben 72 TWh, seguita da Canada e Germania. Mentre, tra i maggiori importatori, abbiamo gli Stati Uniti (47 TWh), l'Italia (al secondo posto con 38 TWh) e la Germania (37 TWh).

Fig. 16 – Quote di elettricità prodotte dalle diverse fonti nel 1973 e nel 1996.



Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Per quanto riguarda le fonti che hanno prodotto questa energia elettrica – si ricordi, 6.118 TWh nel 1973 e 13.652 TWh nel 1996 – non vi sono stati notevoli cambiamenti per carbone, gas, idroelettricità e rinnovabili. Non altrettanto si può dire per il petrolio, il cui *share* è drasticamente diminuito dal 24,6 al 9,3% della generazione mondiale di elettricità. Mentre il nucleare – passando dal 3,3% al 17,7% - ha in buona parte compensato il ridotto sfruttamento del petrolio.

2.2 – Previsioni per il futuro[87]

L'*International Energy Agency* (IEA) ha fornito uno scenario energetico fino al 2020 di tipo "*business as usual*", cioè con precise ipotesi di base: una crescita annua del PIL del 3%, della popolazione del 1,2% e con un andamento dei prezzi dei combustibili fossili ipotizzato costante fino al 2010 e poi in crescita di circa 50$ per tonnellata dal 2010 in poi (tranne che per il carbone, il cui prezzo inizierebbe a salire già dal 2005).[88]

Date queste ipotesi, si avrebbe che la domanda mondiale di energia, con una crescita annua del 2%, nel 2020 aumenterebbe del 70% rispetto ai valori attuali, con una copertura di quasi il 95% della domanda addizionale da parte dei combustibili fossili, seppure con variazioni rispetto ai loro rapporti odierni.

A questo punto però, se in base a questo scenario si calcolano le conseguenti emissioni di anidride carbonica, si vede che queste non solo non diminuiscono (come precettato dagli accordi di Kyoto), ma al contrario aumentano circa del 35% nei paesi OCSE e del 105% nel resto del mondo. Ora, dal momento che a Kyoto sono stati presi dei seri impegni internazionali, sembra logico pensare che si cercherà di rispettarli.

Tab.7 – Copertura prevista della domanda mondiale di energia entro il 2020.

Copertura della domanda (%)		
Fonte	**1996**	**2020**
Carbone	27%	30%
Petrolio	39%	37%
Gas	24%	26%
Nucleare	7%	4%
Idro-geo	2%	3%

Fonte: Anonimo, *Presentazione*, in Spezia, U. (a cura di), *Energia nucleare*, op. cit..

Per tale motivo, l'IEA ha elaborato due ipotesi per ridurre le emissioni di CO_2: 1) sostituire i combustibili fossili con il nucleare e le fonti rinnovabili, nella generazione di elettricità, per eliminare il 50% delle emissioni superiori a quelle previste a Kyoto; 2) aumentare l'intensità energetica dell'industria (oltre all'introduzione di una carbon tax e alla sostituzione dei combustibili fossili con fonti rinnovabili e nucleare) per abbattere il restante 50%. Chiaramente si avrebbero così delle variazioni rispetto allo scenario precedentemente ipotizzato, con un forte aumento del nucleare ed un'altrettanto significativa riduzione dei combustibili fossili.

---

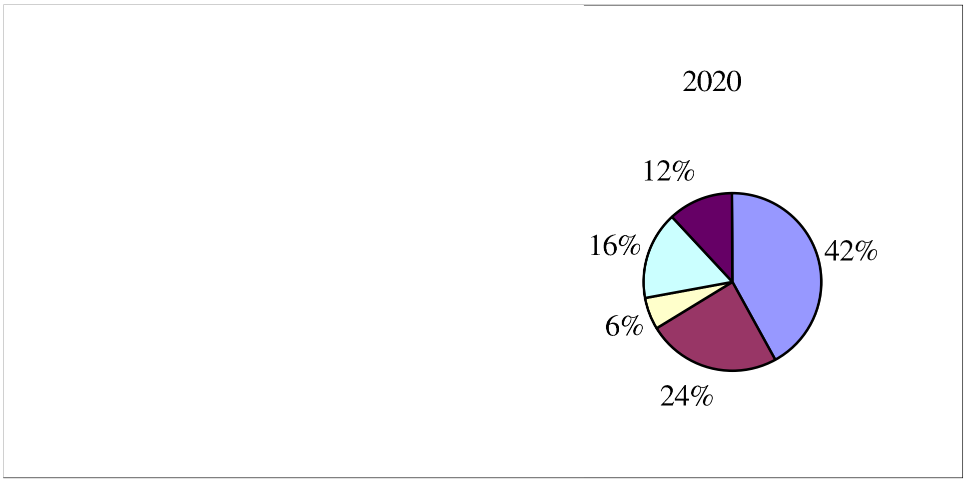
87 Come i precedenti dati riferiti alla situazione attuale, anche quelli riguardanti il futuro scenario energetico sono stati elaborati sulla base dei dati in Curcio E., *Scenari energetici di medio e lungo periodo*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 63-72.

88 Cfr.: IEA, *Business-as-usual projections*. Sito Internet: http://www.iea.org/g8/world/baup.htm

È sottinteso che anche la ripartizione per aree geografiche della domanda di energia subirà dei cambiamenti con un grande incremento della richiesta da parte dei PVS e dell'Asia Orientale.

La NEA ha recentemente fatto delle previsioni sullo sviluppo della domanda elettronucleare nei paesi OCSE e ha previsto una crescita della quota elettronucleare sul totale delle forniture elettriche del 20-25% in Nord America e del 40-60% in Europa e Giappone, sull'ipotesi che l'economia mondiale e le politiche di governo seguano il *trend* attuale. [89]

Fig. 17 – Ripartizione della domanda di energia per aree nel 1995 e attesa nel 2020.



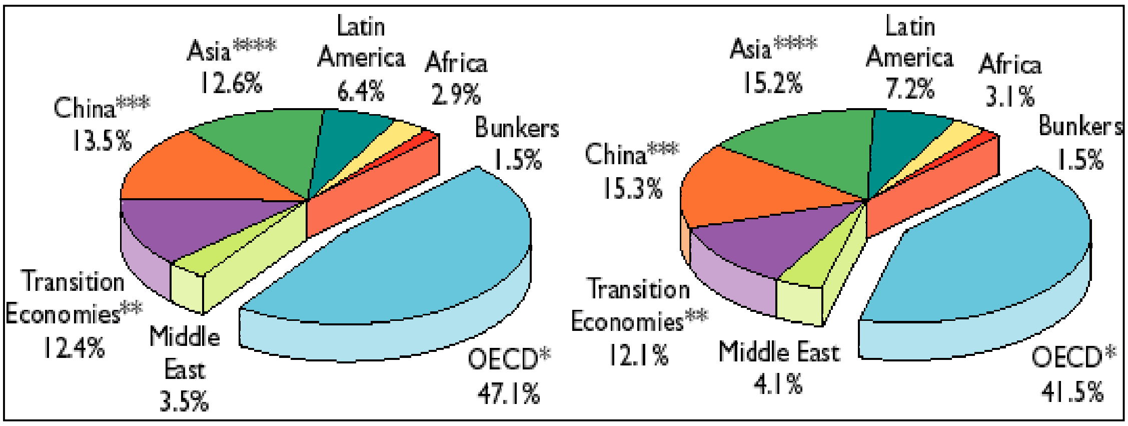
Fonte: Anonimo, *Presentazione*, in Spezia, U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.

Per quanto riguarda l'offerta mondiale di energia di base, essa passerebbe dagli oltre 8.000 Mtep del 1996 a 11.500 Mtep nel 2010 e a 13.700 Mtep nel 2020. La quota maggiore spetta ancora al petrolio (con il 38,3%), seguito dal carbone (28,7%) e del gas naturale (25,2%). Lo *share* previsto per il nucleare (4,4%) dipende dall'ipotesi che le politiche sul nucleare annunciate in molti paesi occidentali vengano o no messe in atto (e cioè che non si costruiscano nuovi impianti, senza però fermare quelli esistenti), di conseguenza la quantità di energia prodotta dal nucleare resterebbe simile a quella attuale (2.416 TWh), ma la sua quota sull'energia totale sarà più che dimezzata.

Anche dal punto di vista delle nazioni in grado di produrre quest'offerta ci sarebbero dei cambiamenti, ma non così pronunciati, con una graduale diminuzione dello *share* dei paesi OCSE e dell'ex-Unione Sovietica, ed un più forte aumento nella quota di Cina, Asia e America Latina.

[89] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

Fig. 18 – Quote regionali dell'offerta totale di energia di base nel 2010 e 2020.



Fonte: IEA, Key world energy statistics, op. cit.

Passando infine al settore della generazione dell'energia, vediamo che esso segue l'andamento della domanda di elettricità e che, comunque, resta il settore che la più alta crescita al crescere del PIL. I combustibili che saranno maggiormente usati sono carbone e gas naturale, il petrolio continuerà ad essere più o meno costante in assoluto, ma utilizzato più per il trasporto che per la produzione di elettricità, mentre vi sarà prima un aumento e poi un declino del nucleare, ed infine una lenta crescita delle fonti rinnovabili.

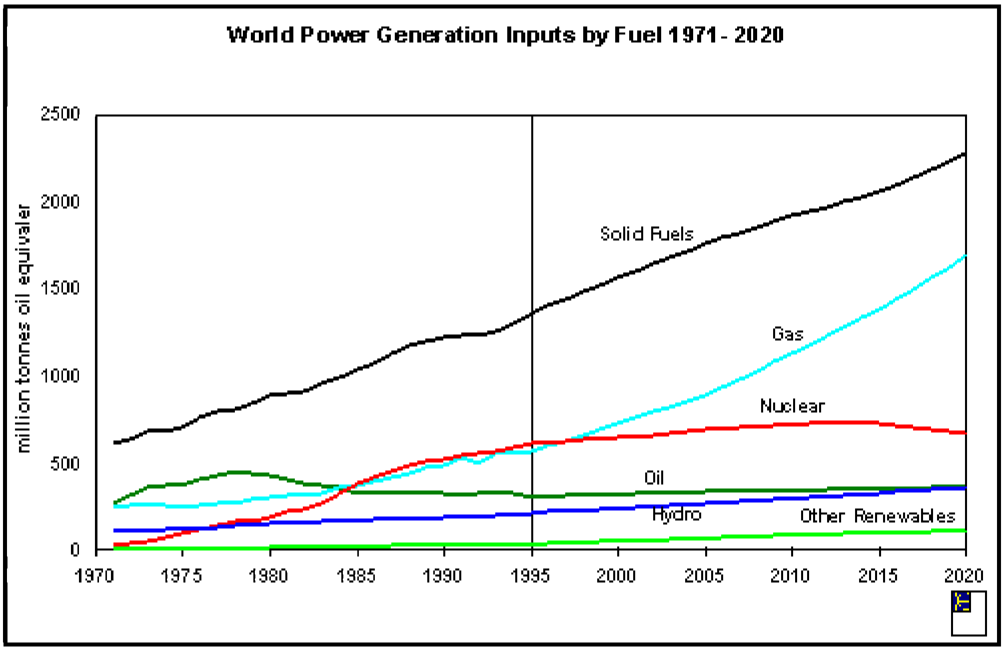
In generale, comunque, entro il 2020 si dovranno costruire nuovi impianti – indipendentemente dalle fonti utilizzate – capaci di fornire in tutto 3.475 GW di energia elettrica. Con un costo capitale medio, per ognuno di essi di 937 $/KW, si avrà un investimento totale di qualcosa come 3.257 milioni di miliardi di dollari.

Riassumendo, quindi, si è tutti d'accordo nell'ipotizzare un forte aumento della domanda di energia a livello mondiale nei prossimi cinquant'anni.

Un ruolo particolarmente importante in questo scenario spetta ai paesi in via di sviluppo e soprattutto al blocco asiatico. Qui, infatti, sono numerosi gli aspetti determinanti: alto tasso di natalità, graduale aumento del benessere, alto potenziale nella valorizzazione delle loro risorse naturali, grado di efficienza nello sfruttamento dell'energia, politiche economiche nei loro confronti da parte delle nazioni industriali, le quali costituiscono i mercati di sbocco del loro sviluppo, oltre che le fonti del trasferimento di tecnologie, conoscenze e capitali verso queste zone.

Per quanto riguarda i paesi già industrializzati, sebbene siano caratterizzati da un costante miglioramento dei rendimenti energetici (più che raddoppiati nel giro di pochi anni), si troveranno comunque davanti ai limiti imposti dalla tecnologia.

Fig. 19 – Produzione mondiale di energia con diverse fonti tra il 1971 e il 2020.



Fonte: Anonimo, *Fuels used for power generation*, IEA. Sito Internet: http://www.iea.or/g8/world/fuels.htm

Date queste premesse si può in tutta serenità affermare che tanto il petrolio quanto il metano resteranno ancora a lungo delle fonti indispensabili nel panorama energetico. Ma la loro dipendenza da squilibri politici e da conformazioni geologiche particolari e la loro posizione sfavorevole sul piano ambientale, fa sì che vi sia una generale tendenza a ridurre il loro utilizzo e diversificare le fonti energetiche. Sebbene, nel calcolare il valore economico di ognuna di esse sia necessario tenere conto, oltre che del costo di produzione (cui sono associati anche la reperibilità del combustibile e la sua difficoltà di sfruttamento), anche i costi esterni legati all'impatto ambientale, alla gestione dei rifiuti (le scorie) o alla stabilità politica (plutonio per scopi militari o controllo dell'OPEC sul petrolio). Probabilmente nel futuro saranno proprio questi ultimi costi a farci optare per una forma di energia o l'altra.[90] Resta comunque sottinteso che i paesi che possono maggiormente trarre vantaggi dalle opzioni tecnologiche avanzate sono quelli industrializzati (che tra l'altro hanno già sfruttato le fonti meno costose, come quella idroelettrica).

Nonostante ciò, però, è stato calcolato che l'autonomia energetica dell'EU potrebbe passare dal 50 al 30% nei prossimi vent'anni, ed in particolare potrebbe scendere – entro il 2010 – dal 52% al 20% per il petrolio, dal 70 al 45% per il gas naturale e dal 58 al 36% per il carbone. Di qui, la preoccupazione di carattere energetico che caratterizza l'Europa, soprattutto in questo momento di alti costi del petrolio. Proprio per tale motivo è stato ribadito il ruolo del nucleare anche nell'ambito dell'ultimo

[90] Cfr.: Leonardi A., *Il mio nucleare pulito*, in "Galileonet", 5 dicembre 1998. Sito Internet: http://galileonet.it/archivio/index.html

Congresso del *World Energy Council*, dove si è apertamente dichiarato come sia poco credibile l'ipotesi di un abbandono in massa dell'energia nucleare, se si intende tener fede agli accordi di Kyoto.[91]

2.3 – Le politiche energetiche: tra sviluppo sostenibile e liberalizzazione del mercato

Come giustamente ha affermato l'ex ministro per la Scienza e la Tecnologia, on. Colombo: "non c'è una ricetta semplice e uguale per tutti".[92] Dunque ogni paese deve necessariamente adottare l'opzione energetica più adatta alle sue caratteristiche geologiche, politiche, economiche e sociali, facendo però in modo che queste scelte siano coerenti con le strategie a più lungo termine comuni a tutti i firmatari di Kyoto.

Una buona politica energetica deve migliorare la sua efficienza, ridurre le emissioni di gas-serra e di residui nocivi e diminuire la dipendenza dai combustibili fossili. In questo senso hanno seguito notevoli politiche energetiche paesi come il Giappone, la Francia, l'Olanda, la Danimarca e la Norvegia. Buona è stata anche la politica statunitense, nonostante i consumi energetici più elevati a livello mondiale, e proprio da questo paese verranno probabilmente i più importanti progressi tecnologici nei prossimi anni. L'Italia è invece stata caratterizzata da una politica energetica discontinua ed incoerente, come logico risultato della cronica instabilità politica del nostro paese, ma ciononostante è un dato positivo l'alta efficienza energetica del settore industriale.

Infine, da non dimenticare, è l'esempio che ci viene da paesi non ancora interamente industrializzati, come ci dimostra la Cina, che con il suo miliardo e più di abitanti, è ben conscia del ruolo che la sua politica energetica gioca a livello climatico e per questo cerca soluzioni tecnologiche, per le quali necessita però di aiuto sia scientifico che economico. Ed è proprio a tale riguardo che l'on. Colombo, riprendendo un'espressione ormai famosa, afferma che l'Italia dovrebbe avere, nei confronti della Cina, un atteggiamento di "*long term, enlightened self-interest*".[93]

Il punto fondamentale dunque è una gestione corretta dell'energia, anche se è difficile trovare un accordo su questo concetto. In ogni caso, una particolare importanza ha il risparmio energetico, cioè un impiego razionale dell'energia, che consenta di ottenere gli stessi risultati in termini di servizi energetici, ma producendo meno energia; si tratta in pratica di una fonte energetica supplementare e "virtuale", poiché ciò che non è consumato non deve essere prodotto. Uno dei settori dove si ha un maggiore spreco dell'energia è quello edilizio (che rappresenta circa un terzo del consumo totale di

---

[91] Cfr.: Fornaciari P., *Il futuro dell'energia nucleare nell'Europa occidentale,* in "21mo Secolo. Scienza e tecnologia", n °2, luglio 1999, pag. 22.

[92] Cfr.: Sereni V., *"Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo*, in "Galileonet", anno III, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet/ archivio/index.html

[93] Cfr.: Sereni V., "Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo, op. cit.

energia) e proprio per questo motivo si è molto parlato, a livello europeo, di "architettura bioclimatica" – la quale cerca di assicurare un microclima costante per tutto l'anno – e di "certificazione energetica degli edifici", onde garantire un più alto risparmio energetico nell'industria edile.[94]

Comunque, oggigiorno la politica energetica non può prescindere dai vincoli ambientali. E proprio per questo si parla di sviluppo sostenibile.

2.3.1 – Lo sviluppo sostenibile

Il concetto di sviluppo sostenibile contiene in sé sia l'idea di uno sviluppo economico che possa essere sostenuto indefinitamente evitando l'avvicendamento ciclico di espansione e crisi, sia l'idea che questo sviluppo non debba impoverire le risorse ambientali e sociali, né lasciare un mondo difficilmente gestibile alle generazioni future.

Ma, da un punto di vista strettamente analitico è difficile non notare le forti difficoltà logiche che si pongono nel discorso su sviluppo sostenibile–energia–ambiente. Per quanto riguarda i paesi industrializzati, sviluppo sostenibile vuol dire ridurre le emissioni di gas-serra – cioè diminuire il consumo di carbone e petrolio – senza poter però contare sul nucleare (per motivi di opinione pubblica), né sulle rinnovabili (perché ancora tecnicamente incapaci di soddisfare la domanda d'energia). Ma non esistono solo i paesi ricchi. Infatti, se da una parte si vuole giustamente aiutare i PVS nel loro cammino verso una situazione socioeconomica migliore – e per intraprendere questo cammino i PVS hanno bisogno di usare energia in quantità sempre maggiori – dall'altra parte è pur vero che, contemporaneamente, i paesi industrializzati pongono vincoli ambientali sempre più ardui che difficilmente potranno essere rispettati dai paesi in via di sviluppo, se non a prezzo del proprio progresso.

Resta perciò difficile non essere d'accordo con l'idea che talvolta più che di "sviluppo sostenibile" si parla in realtà di " 'ambientalismo insostenibile' visto che spesso ci si basa per 'sostenerlo' su informazioni scorrette, affermazioni sbagliate, dogmi inaccettabili sia scientificamente che socialmente" e giustamente, rendere lo sviluppo " 'sostenibile' significa, dal punto di vista energetico, trovare il giusto *mix* delle fonti e la loro corretta distribuzione sulle varie aree geografiche del pianeta".[95] Se si guarda ai dati sulla prevista popolazione mondiale nel 2020 (circa 7,5 miliardi di persone) e sul fabbisogno energetico atteso per lo stesso anno (circa 14.000 Tep), si vede che l'80%

---

[94] Si tratta in realtà di un concetto già noto da lungo tempo, come dimostrano l'insediamento indiano di Mesa Verde in Colorado e i trulli e le grotte di Matera nostrani. Cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

[95] Cfr.: Ricci R.A., *Il ruolo del nucleare nelle strategie ambientali*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21^mo secolo, Milano 1999, pp. 95-108.

della popolazione avrà accesso a non più del 50-60% dell'energia prodotta. Ciò rischia di creare una nuova forma di colonialismo, un colonialismo non più economico o politico ma energetico.

2.3.2 – Liberalizzazione del mercato energetico

Poiché negli ultimi anni sono stati scoperti sempre nuovi giacimenti di combustibili fossili e poiché il loro prezzo è rimasto abbastanza stabile (se si escludono i periodi della guerra del Golfo e quello attuale), l'attenzione dei governi, non più preoccupati per l'approvvigionamento di combustibili, si è spostata sugli effetti ambientali del ciclo energetico. Ma se negli scorsi anni si riteneva che solo il potere statale fosse in grado di attuare delle politiche ambientali, oggi invece sembra esserci un riconoscimento della capacità delle forze di mercato a rendere efficaci le misure di tutela ambientale, grazie all'allocazione ottimale delle risorse.

Eppure, anche in caso di un buon funzionamento della concorrenza nel mercato energetico, potrebbero sorgere altri ostacoli al raggiungimento dell'efficienza, ad esempio: informazione imperfetta, alti costi di transazione per utenti non professionisti del campo energetico, difficile conteggio delle esternalità, ruoli istituzionali rigidi assegnati alle aziende energetiche, orientamento intrinseco del mercato verso il breve periodo (fatto incompatibile con lo sviluppo sostenibile), ecc. Ecco, dunque, che i governi devono assumere una funzione, esclusivamente, di indirizzo e di controllo del mercato, attraverso la definizione di un contesto giuridico-normativo, che da un lato permetta il libero agire della concorrenza ed il raggiungimento dell'efficienza energetica, tramite la liberalizzazione, e dall'altro assicuri la sicurezza dell'approvvigionamento, l'utilizzo di fonti alternative e l'investimento nella R&S.[96]

Dunque, nel fare un'analisi dei possibili scenari energetici futuri, è anche necessario tener conto del processo di liberalizzazione del mercato dell'energia elettrica a cui si sta assistendo in Europa in questi ultimi anni. In effetti, in questo mercato si può notare un aumento dell'interdipendenza energetica, il dissolvimento dei monopoli ed il conseguente decentramento amministrativo, seppure sotto il controllo e la regolazione del settore pubblico. Questa ristrutturazione deve però avvenire nel rispetto, da un lato, delle caratteristiche proprie del mercato, e, dall'altro, della necessità di tutelare: l'ambiente, alcuni gruppi territoriali e sociali svantaggiati e la R&S. Dunque abbiamo una duplicità insita nel mercato energetico attuale: tendenza alla liberalizzazione, a livello nazionale, e tutela dell'ambiente, in base ad accordi internazionali. Per la liberalizzazione dei mercati dell'energia elettrica e del gas, in tutta l'EU si perseguono principalmente gli obiettivi di:

- promozione della concorrenza e dell'efficienza, garantendo l'universalità di un servizio pubblico;

[96] Cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

- qualità, fruibilità, sicurezza e diffusione dei servizi, garantendo l'accesso paritario di tutti gli utilizzatori;
- economicità e redditività di operatori ed esercenti riguardo all'energia elettrica, in riferimento all'utilizzo delle fonti energetiche primarie;
- valorizzazione delle imprese e degli enti locali;
- incentivazione, attraverso politiche di sostegno e di stimolo, all'uso delle fonti energetiche rinnovabili e al risparmio energetico.[97]

Il paese che oggi si trova in posizione esemplare è la Gran Bretagna, con una struttura del proprio mercato interno caratterizzata da un alto grado di concorrenza, privatizzazione e decentralizzazione; mentre gli altri paesi europei si muovono ancora nello stadio iniziale di attuazione delle direttive europee.

La tendenza generale è quella di avere un crescente numero di attori sulla scena energetica: più produttori di energia elettrica, un unico gestore della rete di trasmissione e, di nuovo, una pluralità di distributori e venditori indipendenti, senza contare la nascita di società di commercio ed intermediazione, società di servizio, nuovi soggetti economici per il finanziamento ed il leasing di servizi innovativi, e così via. Inoltre, l'attenzione verso l'efficienza nell'utilizzo finale dell'energia fa sì che anche ogni consumatore finale, dall'industria al privato cittadino, diventi un attore del ciclo energetico.[98] E come se ciò non bastasse, gli investimenti in efficienza energetica ridurrebbero il numero di unità d'energia utilizzate a parità di servizio emesso, vi sarebbe dunque una riduzione tanto della "bolletta" energetica, quanto dell'esborso per l'importazione di combustibili. La ricchezza così liberata potrebbe dunque essere reinvestita a livello nazionale per finanziare: attività di R&S, sistemi di informazioni ed incentivi all'adozione di tecnologie efficienti, diffusione delle fonti alternative, apportando miglioramenti alla produttività nazionale ed al livello dell'occupazione.[99]

Ai nostri fini, è particolarmente interessante notare l'importanza data alla R&S nell'ambito della ristrutturazione del settore. Infatti, seguendo le indicazioni di Sergio Garibba,[100] membro

---

[97] Si tratta della Direttiva 96/92/CE riguardante la liberalizzazione e della Legge Comunitaria n. 128/1998, riguardante il recepimento della suddetta direttiva. Cfr.: Anonimo, *I nuovi assetti del settore energetico: la privatizzazione e le Direttive europee*, in Salvi L. A. (a cura di), *Conferenza nazionale energia e ambiente*, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 – XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999.

[98] A tale riguardo, cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

[99] Cfr.: Clò A., *La rivoluzione elettrica*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

[100] Cfr.: Garibba S., *Innovazione tecnologica e mercato dell'energia elettrica*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 73-86.

dell'Autorità per l'energia elettrica e il gas, vengono previsti, nella direttiva UE, dei meccanismi intrasettoriali per l'innovazione tecnologica:

- concorrenza, anche internazionale, per il riposizionamento tecnologico (investimenti diretti e IPP)
- strutture consortili per le attività strategiche di ricerca e sviluppo (co-competizione)
- gare per contratti di ricerca e sviluppo (identificazione degli obiettivi)
- gestione innovativa delle attività nucleari residue.

Il motivo per cui viene data particolare importanza alla ricerca ed all'innovazione, nel settore elettrico, è che in esse l'EU riconosce "un fondamentale motore di competitività e di efficienza", in quanto l'energia è uno dei fattori primari della produzione . Certamente, si parla soprattutto di miglioramenti agli attuali metodi di generazione di elettricità, e quindi di maggiore efficienza, minor uso delle risorse, diminuzione dei costi e ammodernamento degli impianti. Ma, resta comunque la necessità di sviluppare nuovi strumenti di produzione di energia, in previsioni di possibili future variazioni nei prezzi in direzione poco vantaggiosa per l'EU.

Sicuramente, l'attuale tendenza del settore energetico verso la *deregulation* e la privatizzazione porterà ad una maggiore attenzione verso la competitività e la minimizzazione dei rischi. Dunque, saranno le tecnologie con bassi costi di capitale e di produzione, tempi di costruzione brevi, incrementi di capacità produttiva direttamente proporzionali alla crescita del fattore di carico, e , infine, con problemi minimali di accettazione da parte dell'opinione pubblica e delle direttive statali e/o europee, ad attrarre maggiormente gli investitori.

In tutto il mondo si cerca di far entrare nel settore energetico gli investitori privati e di sviluppare la concorrenza in questo settore che, fino a poco tempo fa, veniva visto come un monopolio naturale. La concorrenza stimola l'innovazione, aumenta la produttività, migliora l'allocazione delle risorse e incoraggia una conversione più efficiente dei combustibili in energia, insomma accresce l'efficienza del settore e una maggiore efficienza dovrebbe significare prezzi più bassi per gli utenti finali. Ma proprio quest'ultimo aspetto potrebbe scoraggiare, dal punto di vista produttivo, un aumento dell'efficienza negli usi finali dell'energia e quindi ostacolerebbe il raggiungimento degli obiettivi ambientali. Perciò, se da una parte la liberalizzazione del mercato energetico apporta indiscutibili benefici economici, dall'altra potrebbe creare degli svantaggi ambientali.

Proprio questo è il motivo per cui i governi sono dovuti intervenire, attraverso gli accordi di Kyoto, per far sì che si tenga conto delle esternalità (cioè dei costi che la collettività subisce come conseguenza di fenomeni di carattere ambientale dovuti all'uso di fonti energetiche particolarmente inquinanti), la più preoccupante delle quali è il riscaldamento globale. Possibili strumenti sono: tasse, permessi commerciabili o regolamentazione diretta (per una trattazione più dettagliata si rimanda al cap.4, par. 4.1.1).[101]

2.4 – I paesi OCSE, l'Unione Europea e l'energia

È atto doveroso riconoscere all'Europa, ed ai paesi OCSE in generale, dell'ultimo mezzo secolo il costante impegno a diminuire la propria dipendenza dai combustibili fossili (carbone escluso), poiché provenienti da aree extraeuropee e, di solito, politicamente instabili. Questo atteggiamento ha portato a forti incentivazioni verso le altre fonti energetiche, dal nucleare alle rinnovabili, e verso la ricerca di nuovi impianti che permettano sia la diversificazione delle fonti, che la sicurezza dei cittadini, che la diminuzione dei costi di produzione.

Allo stesso tempo la domanda di energia nei paesi OCSE resta comunque in crescita, anche se ad un ritmo più lento rispetto al passato. In questo contesto, è chiaro che si dimostreranno vincenti le strategie più flessibili, basate su impianti di piccola taglia, con costi di investimento relativamente bassi e con veloci tempi di realizzazione.[102]

In ogni caso, poiché buona parte del discorso seguente è basato sulle situazioni attuali e previste della generazione di energia in questi paesi, si ritiene che sia qui opportuno accennare unicamente agli indirizzi di massima che verranno perseguiti all'interno di questa organizzazione.

È pertanto logico pensare che la politica energetica dei paesi OCSE cerchi di mantenere questa linea, senza eccessive novità, i cui orientamenti principali sono:

- diversificazione delle fonti rispetto al petrolio ed al gas di importazione;
- riduzione dei consumi di fonti fossili per limitare i rilasci di gas nocivi nell'atmosfera;
- limitazione dei costi di produzione;
- incentivi per le fonti rinnovabili.[103]

Allo stesso modo, anche all'interno dell'Unione Europea, la politica energetica che si vuole perseguire, come si evince dal Libro Bianco (1995), è basata su tre obiettivi principali:

<u>1 - la competitività.</u> Il settore energetico comunitario deve essere competitivo nel suo insieme, con un libero mercato dell'elettricità e del gas naturale all'interno dell'EU (ottenibile attraverso

---

[101] Cfr.: Priddle R., *Energy and sustainable development,* in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 2-6.

[102] Cfr.: Clò, A., *La rivoluzione elettrica*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

[103] Come riportato in Cumo M., Naviglio A., Sorabella L., *Competitività dell'energia elettronucleare*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp.127-153.

un'armonizzazione delle norme relative ad ogni aspetto di questo settore), in modo da giocare un ruolo prioritario nei mercati mondiali dell'energia;

2 - la sicurezza nell'approvvigionamento. L'EU deve diminuire la propria dipendenza energetica da paesi terzi e quindi deve incentivare: lo sfruttamento di diverse fonti (senza dimenticare l'importanza che il settore elettronucleare ha in questo ambito), la ricerca delle risorse energetiche – indipendentemente dalla loro posizione geografica – e infine l'innovazione tecnologica;

3 - la protezione dell'ambiente. Al fine di assicurarsi uno sviluppo sostenibile, l'Unione Europea deve: aumentare la propria efficienza energetica, incentivare l'uso delle fonti rinnovabili e preparare una strategia di R&S comunitaria rivolta ad ogni settore energetico.[104]

In questo clima, la Commissione Europea ha deciso di rivolgere una particolare attenzione alle fonti rinnovabili, incentivandone il ruolo senza però dimenticare che esse, da sole, non saranno mai in grado di soddisfare i bisogni energetici europei.

In tal senso, infatti, l'EU si è posta come serio obiettivo, come abbiamo già avuto modo di dire, quello di sviluppare il contributo delle rinnovabili alla generazione di energia, ma, conscia della loro scarsa crescita dal 1990 ad oggi, ha segnalato quali sono le premesse indispensabili ad un loro maggior utilizzo:

- l'internalizzazione dei costi esterni relativi alle diverse fonti energetiche (anche se una tale operazione non gioverebbe neppure alle rinnovabili, poiché non sono così "pulite" come generalmente si crede);[105]
- l'armonizzazione, a livello europeo, delle norme in favore delle fonti rinnovabili, nel settore fiscale, della protezione dell'ambiente e degli *standard* tecnologici;
- la creazione di una strategia globale europea per la promozione di queste fonti;
- un particolare sostegno all'energia solare, eolica e dalla biomassa, e quindi l'aumento degli incentivi ad esse destinati;
- l'istituzionalizzazione di un gruppo di lavoro "Energie rinnovabili" che coordini le attività a livello europeo;
- l'introduzione delle fonti rinnovabili nel programma ALTENER II che si occupa di R&S di energie alternative.[106]

Ma a fronte di un tale impegno verso le fonti di energia "pulita", l'EU non ha dimenticato di considerare il nucleare che, come si ricorderà, fornisce all'Europa circa il 17% della produzione interna di elettricità. Infatti, nel 1997 è stato adottato il PINC (Programma illustrativo dell'energia nucleare della Commissione) con lo scopo di valutare serenamente i vantaggi e gli svantaggi derivanti da un uso massivo del nucleare. Le conclusioni sono state che l'energia dei nuclei deve restare un'opzione aperta per il futuro energetico dell'Europa, la quale dovrebbe creare una sorta di

---

[104] Cfr.: Caccia Dominioni F., *Speech to the European Commission,* European Commission, Aachen 13 May 1997 . Sito Internet: http://europa.eu.int/en/comm/dg/s97001c.htm

[105] A tale riguardo si confronti il cap. 4, par. 4.3.

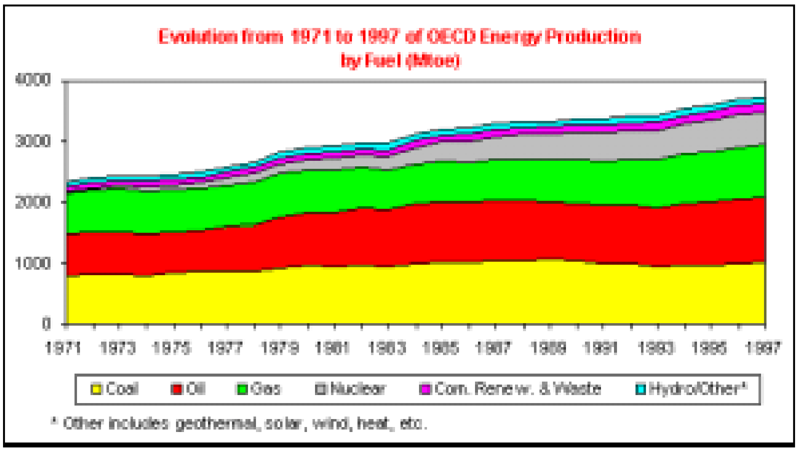
[106] Cfr.: Rothe M., Relazione sulla comunicazione della Commissione dal titolo "Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili – Libro Verde per una strategia comunitaria", Parlamento Europeo, 12 maggio 1997. Sito Internet: http://europa.eu.int/dg1/a4/it/a4-97/a4-0168.htm

codice di condotta comune a tutti i paesi membri, pur nella libertà di scelta sull'utilizzo o meno di questa forma di energia. Tra i vari suggerimenti vi sono stati quelli di estendere la cultura del nucleare sicuro – con dovizia di particolari e di nozioni – tanto all'opinione pubblica, quanto ai paesi dell'Est[107] e quello di finanziare un'attiva R&S per trovare nuove forme di energia nucleare. Come le altre, anche l'*Energy Amplifier* si inserisce proprio in questa area tematica del Quinto Programma Quadro e, come le altre, merita di essere finanziato ed aiutato a raggiungere rapidamente lo stadio della costruzione del prototipo, come ha giustamente affermato anche il Dott. Caccia Dominioni, Direttore alla Commissione Europea.[108]

È dunque un fatto che:

> "l'avvenire elettronucleare resta una questione di scelte, scelte che saranno determinate dai governi nazionali autonomamente o di concerto, e che potranno essere influenzate – ma certamente non bloccate – dalle preoccupazioni dell'opinione pubblica. [Infatti] La scelta degli elettroproduttori tenderà [semplicemente] a vertere sulla soluzione meno costosa per soddisfare la domanda prevista nel rispetto del quadro previsionale, regolamentare e istituzionale locale".[109]

Fig. 20 – Produzione d'energia nell'OCSE tra il 1971 e il 1997 (Mtep).



Fonte: IEA, *The OECD's energy in charts and graphs*. Sito Internet: http://www.iea.org/stats/files/selstats/oenprode.htm

2.5 – I paesi in via di sviluppo e l'Asia orientale

Sicuramente più interessante e difficile è l'analisi della futura situazione energetica dei PVS e dell'Asia Orientale.

Per quanto riguarda la situazione attuale, l'analisi è presto fatta: esistono ancora due miliardi di persone che non hanno accesso ad alcuna fonte energetica commerciale. Inoltre, sebbene sia stata

[107] Cfr.: Regge T., *Centrali russe, spada di Damocle*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", 3 marzo 1999.
[108] Cfr.: Caccia Dominioni F., *Speech to the European Commission,* European Commission, Aachen 13 May 1997 . Sito Internet: http://europa.eu.int/en/comm/dg/s97001c.htm
[109] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

calcolata una crescita del consumo di energia, tra il 1980 e il 1995, del 108% in Asia (compreso Medio Oriente ed esclusi paesi dell'OCSE), del 61% in Africa e del 43% in America Latina, non ci si deve lasciare fuorviare dalle percentuali. Infatti, se si guarda ai consumi di energia pro-capite, si ottiene una fotografia delle condizioni di vita di questi paesi; oggi il consumo medio di energia è di 1,56 tep all'anno pro-capite, ma in Africa è di 0,5 tep a persona, in Cina è di 0,83 tep e in India di 0,33 tep. Infine ci basti sapere che Africa, Asia (esclusa l'ex-URSS) e America Latina, insieme, producono appena il 25,5% dell'elettricità totale, sebbene vi risiedano quasi i tre quarti delle popolazione mondiale.[110]

I PVS, pur avendo ancora notevoli risorse naturali (biomasse, energia idraulica, solare o eolica) trovano più conveniente e rapido l'uso dei combustibili fossili per migliorare le proprie condizioni di vita, al fine di poter raggiungere gli *standard* di benessere del mondo industrializzato. Questo loro desiderio porta quindi a prevedere nel prossimo futuro un forte aumento della loro domanda di energia.

Ora, presa come punto di partenza la globalizzazione (non solo economica) odierna, vengono spesso ipotizzati due tipi di scenari geopolitici.[111]

Il primo, che può essere definito ottimista, è caratterizzato da una forte collaborazione economica fra paesi. In questo scenario, i paesi del terzo mondo, i PVS e le economie in transizione godrebbero di uno sviluppo guidato dalle forze di mercato, cioè da investimenti da parte dei paesi industrializzati, ma con inevitabili ricadute positive, che permetterebbero loro di partecipare ad un'economia sempre più globale ed interconnessa e di svilupparsi secondo la logica di mercato.

Il secondo scenario, invece, è caratterizzato da blocchi economico-politici contrapposti. In pratica, si avrebbero nuove barriere e nuove tensioni tra aree del pianeta sotto influenze diverse, insomma una ripetizione del mondo della guerra fredda, ma probabilmente con superpotenze diverse. Le conseguenze qui sarebbero piuttosto diverse da quelle del primo scenario, per i paesi poveri. Infatti, ora essi verrebbero attirati all'interno di uno dei blocchi soprattutto per motivi politico-militari e si troverebbero sempre in posizione subordinata rispetto alla potenza dominante, il che permetterebbe loro di ricevere aiuti e cooperazione, ma non di svilupparsi in modo autonomo.

Dal punto di vista energetico, mentre nel primo scenario i PVS verrebbero ad utilizzare le fonti di energia oggi comuni nei paesi ricchi, cioè petrolio e gas, poiché sono le meno costose, nel secondo, invece, essi sarebbero probabilmente indotti all'utilizzo di soluzioni energetiche più tecnologiche al fine di essere tenuti in una posizione di necessitata aderenza alla propria area, poiché non sarebbero in grado di gestire da soli le tecnologie di punta loro imposte.

---

[110] Cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

[111] Cfr.: Marazzi M., *Investire sul futuro. Intervista a Sergio Garribba*, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

A ciò bisogna aggiungere il tasso di interesse. Tasso che, essendo basso nel lungo periodo all'interno del primo scenario, permetterebbe di incentivare gli investimenti in impianti energetici ad alta intensità di capitale e di tener conto di problemi intergenerazionali, come l'effetto serra. Al secondo scenario, invece, è associato un alto tasso di interesse nel lungo periodo, quindi si avrebbe l'utilizzo di energia a basso costo e uno sfruttamento eccessivo delle risorse planetarie con scarsa attenzione al problema dello sviluppo sostenibile.

Vista la situazione attuale dell'economia mondiale, sempre più globalizzata, e visti i raggiunti accordi internazionali per un serio impegno verso uno sviluppo sostenibile, si può ragionevolmente ritenere che il mondo tenda a configurarsi secondo il primo scenario. Ciò in effetti permetterebbe ai PVS e, in particolare al Terzo mondo, di uscire dal "medioevo energetico" in cui si trovano. Infatti il ricorso a fonti energetiche non commerciali, come il legno, i residui vegetali e altro, impedisce loro di intraprendere un percorso di sviluppo, a motivo degli effetti a cascata dovuti alla mancanza di energia elettrica, vale a dire la mancanza di telecomunicazioni, carenze di informazione e di formazione.[112]

Ora, dal punto di vista economico-energetico (senza entrare qui nel merito di questioni politico-militari) l'utilizzo dell'attuale energia nucleare sarebbe una scelta poco conveniente per i PVS, in quanto essa necessita, come abbiamo già visto, di tecnologie di punta e di elevati investimenti di capitali, a meno che al discorso strettamente economico non venga preposto l'argomento dell'indipendenza energetica. Discorso simile vale anche per le fonti rinnovabili, le quali, se già non sono in grado di resistere nei mercati aperti e concorrenziali dei paesi industrializzati, nei PVS non solo non avrebbero prospettive di sviluppo, ma addirittura potrebbero creare degli effetti distorsivi nelle loro economie in crescita.

Resta dunque un fatto che, anche e soprattutto in questi paesi, le fonti convenzionali potranno e dovranno essere sfruttate al fine di conseguire un grado di sviluppo adeguato, e solo in seguito potrebbero eventualmente essere sostituite da fonti più innovative.

Diverso è invece il discorso per l'<u>Asia Orientale</u>, dove non solo sono in costruzione o sono previste nuove centrali nucleari, ma dove viene anche dato un forte incentivo all'innovazione all'interno di questo settore. Infatti, in questa parte del mondo, il settore nucleare viene visto con particolare favore. Basti pensare alla Corea del Sud, i cui 9 reattori - e gli altri 19 in programma – hanno una produttività media dell'87,4%, quando nel resto del mondo la media è del 70% e negli USA è del 75%, con una sicurezza ed affidabilità talvolta superiori a quelle americane.[113]

---

[112] Cfr.: Marazzi M., Investire sul futuro. Intervista a Sergio Garribba, op. cit.
[113] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

Proprio questa buona predisposizione verso il nucleare porta a finanziare abbondantemente la R&S ad esso indirizzata. Infatti, se da una parte abbiamo il Giappone che, grazie alle proprie risorse economiche sta sviluppando un progetto autonomo di ADS, dall'altra abbiamo invece la Cina che, avendo una ricchezza molto inferiore e non potendosi quindi permettere delle così alte spese per la R&S, non ha intenzione di perdere il passo ed è pronta a collaborare con l'estero per assicurarsi i benefici di questa nuova generazione di nucleare.

Secondo le stime fornite dalla Cina, il loro consumo di fonti primarie di energia – oggi 1,4 miliardi di tonnellate equivalenti di carbone – sarebbe pari a 2,5 miliardi nel 2020 e a 5 miliardi nel 2050, momento in cui l'energia elettrica sarà il 43% dei consumi totali e verrà prodotta per il 50% con combustibili fossili, per il 30% con l'energia idraulica e per il 20% con il nucleare.[114] Ora, da quanto emerso durante un convegno organizzato a Pechino nell'aprile del 1999 a cui ha partecipato lo stesso Rubbia, anche in Cina è prevista, nei prossimi anni la costruzione di un prototipo di ADS da 100 kW termici, col fine di sviluppare i *know-how* necessari affinché questa tecnologia possa in futuro soddisfare l'ingente fabbisogno energetico cinese durante i prossimi anni.

La Cina ha espresso l'intenzione di installare i primi prototipi commerciali – disponibili probabilmente dal 2015 – a partire dal 2020 per fornire la quota di energia nucleare prevista, circa 200 GW. In ragione di queste intenzioni del governo cinese, l'ufficio scientifico dell'ambasciata italiana a Pechino non ha mancato di far notare che "le possibili enormi ricadute commerciali, anche se in una prospettiva di 15-20 anni, giustificano un forte interesse italiano a qualificarsi come partner privilegiato nello sviluppo del programma ADS in Cina" attraverso strutture sia pubbliche (o a partecipazione statale) quali il MAE-MURST, l'ENEA e l'INFN, sia private quale l'ANSALDO.[115]

In effetti, per capire le motivazione della Cina riguardo al nucleare bisogna anche tener conto dei gravi problemi ambientali ed infrastrutturali che la caratterizzano e dell'elevato costo di trasporto dei combustibili: l'insieme di questi elementi non le permette di sfruttare il pur economico carbone di produzione interna per soddisfare il fabbisogno elettrico.

Diverso è invece il caso del Giappone, il cui interesse verso l'energia dai nuclei deriva soprattutto dal desiderio di un'indipendenza dall'estero per gli approvvigionamenti.[116]

Dunque, se oggigiorno è l'EU - seguita dagli USA - a detenere il primato nell'utilizzo del nucleare civile, è certo che in futuro la situazione cambierà in seguito allo sviluppo economico in atto nell'Asia orientale.

---

[114] Si ricordi qui che anche in India esiste già un prototipo funzionante di reattore che sfrutta l'uranio estratto dal ciclo del torio.

[115] Cfr.: Zirilli S., *Conferenza "Accelerator Driven Sub-critical System 5-6 April !999"*, Ambasciata d'Italia a Pechino, Ufficio Scientifico. Sito Internet: http://eserep.sede.enea.it/iembchina/S&T_Rubbia.html

[116] Cfr.: Cumo M., Naviglio A., Sorabella L., *Competitività dell'energia elettronucleare*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp.127-153.

2.6 – Il caso italiano

2.6.1 – La dipendenza dall'estero

L'Italia presenta un saldo netto tra le importazioni e le esportazioni di energia di circa 140 Mtep, equivalenti a circa l'80% del fabbisogno interno lordo di energia. Nel nostro paese importiamo il 94% del petrolio, il 90% dei combustibili solidi ed il 68% di gas naturale dei combustibili che usiamo per produrre elettricità, ed inoltre acquistiamo circa 34,3 TWh (= miliardi di kWh) di energia elettrica, che corrispondono a circa il 13% della domanda di energia elettrica nazionale.[117]

Come se la situazione non fosse di per sé già abbastanza preoccupante, c'è anche da considerare che la provenienza delle importazioni è costituita per il 44% dal Nord Africa e per il 40% dal Medio Oriente[118], tutte zone che sono notoriamente ad alta instabilità politica; per tale motivo il nostro paese è facilmente soggetto a crisi economiche derivanti da *shock* energetici.

2.6.2 – L'avversione al nucleare

La situazione italiana si mostra in tutta la propria singolarità non tanto per il fatto di non avere un'alta produzione nazionale di energia, né per la mancata generazione di elettricità dal nucleare, quanto per il fatto di avere chiuso anche i reattori già operativi, al contrario del resto del mondo. Infatti, dal 1987 ad oggi, la potenza nucleare mondiale è aumentata del 40% e, all'inizio del 1998, erano in costruzione ben 36 nuove centrali in 15 paesi diversi. Non solo, ma per meglio comprendere l'unicità dei nostri posizioni è altresì interessante ricordare che, negli anni Sessanta, l'Italia era al terzo posto nel mondo per produzione di energia elettronucleare, dietro soltanto a USA e Gran Bretagna, ma ben davanti a Francia, Germania, Svezia, Svizzera e Giappone.[119] Certo, anche altri paesi sono rimasti scossi da Chernobyl. La Svizzera ha deciso di non costruire nuovi impianti nucleari, ma si è ben guardata dal chiudere quelli funzionanti.[120] Così pure ha fatto la Svezia, con le sue dodici centrali, sebbene oggi si stia ripensando all'affrettata scelta di abbandonare il nucleare, poiché non potrebbe più assicurare l'attuale livello energetico senza creare pericolosi impatti ambientali, come ha dimostrato in pochi mesi la chiusura (a novembre 1999) di un impianto, la cui quota di elettricità dovrà ora essere prodotta da tre milioni di tonnellate di carbone all'anno. Lo stesso dicasi della Germania, dove nell'autunno 1998, i Verdi (al governo con i socialdemocratici) chiesero "un'immediata ed 'irreversibile' rinuncia del paese all'energia nucleare"; inutile dire come

---

[117] Cfr.: Anonimo, *Produzione energetica nazionale e dipendenza dall'estero,* in Salvi L. A. (a cura di), *Conferenza nazionale energia e ambiente*, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 – XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999, pp. 109-110.

[118] Cfr.: Salvi L. A. (a cura di), *Conferenza nazionale energia e ambiente*, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 – XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999.

[119] Cfr.: Fornaciari P., Il petrolio, l'atomo e il metano. Italia nucleare 1946-1997, 21mo Secolo, Milano 1997.

[120] Cfr.: Fornaciari P., *Ripensiamo al nucleare*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 53-62.

il governo abbia poi dovuto fare marcia indietro non solo perché tanto la Confindustria tedesca quanto i produttori di elettricità hanno fatto notare l'impossibilità di chiudere da un giorno all'altro un settore che fornisce un terzo dell'elettricità al paese, ma anche perché con la *deregulation* del mercato elettrico, i cittadini hanno potuto "toccare con mano" l'estrema convenienza del nucleare.[121]
Ma si può aggiungere di più. Infatti, in Italia si pensa che dopo Chernobyl ci sia stato un "generale ripensamento": ebbene, nel 1986 la potenza nucleare mondiale era di 250 MWe, oggi è di 350 MWe. Un aumento del 40% è difficilmente definibile come "ripensamento".

2.6.3 – Breve storia del nucleare in Italia

Dopo le prime sperimentazioni del dopoguerra, nel 1967 iniziò il programma elettronucleare dell'ENEL. Fu così che cominciò a svilupparsi una prospettiva alternativa, ma miope, allo sfruttamento delle risorse petrolifere, nell'intento di rendere il nostro paese autosufficiente dal punto di vista energetico.
Nella realtà, l'Italia rimase piuttosto indietro rispetto alla "mania" atomica europea fino agli inizi degli anni settanta, sebbene avesse già avviato la costruzione di alcuni impianti. Ma, nel 1974 il WWF pubblicò "Morte pulita", una raccolta di informazioni di fonte straniera sui danni e sui rischi del nucleare[122]. Fu quello il primo gemito del futuro movimento antinucleare.
Nel 1975 venne proposto il Piano Energetico Nazionale, che prevedeva l'installazione di 20 centrali, oltre alle tre già in funzione (Trino Vercellese, Borgo Sabotino, Garigliano e quella in costruzione a Caorso). Ma questo piano trovò ostacoli sia nella resistenza da parte dei settori economici non interessati a questa tardiva – rispetto al resto d'Europa – trasformazione, sia nell'incoerenza del governo in materia energetica. A tutto ciò si aggiunse il movimento antinucleare, che rinforzatosi nel tempo grazie agli esempi esteri, contrappose accurate motivazioni tecniche e scientifiche agli studi e alle previsioni ufficiali.
Così, a partire dal 1976, con la manifestazione contro la costruzione della centrale di Montalto di Castro, e passando attraverso le numerose mobilitazioni del 1977, la costituzione nel 1978 del Comitato per il controllo delle scelte energetiche (CCSE, che raccolse attorno alla protesta scienziati, tecnici, associazioni ambientaliste e pacifiste) e la marcia dei 50.000 contro il nucleare a Roma nel 1979, il mito del nucleare cominciò a perdere terreno. La sua caduta fu rinforzata dal susseguirsi di manifestazioni, proteste e occupazioni, ogni qual volta il governo cercasse di rilanciare ed ampliare il programma nucleare. Fu così che, in Italia come all'estero, il movimento antinucleare si saldò a quello pacifista, infatti il progressivo aumento degli arsenali atomici per "impedire" i conflitti era un

---

[121] In particolare in Germania è ora possibile per i cittadini scegliere liberamente da chi acquistare l'elettricità. Cfr.: Anonimo, *L'energia nucleare rimane insostituibile anche per l'Italia, Intervista a Ugo Spezia*, in "21^mo^ secolo. Scienza e tecnologia", anno X, n.4, dicembre 1999, pp. 26-34.
[122] Cfr.: Anonimo, *Energia nucleare*, ENEA. Sito Internet: http://www.enea.it/chiave_energianucleare.htm

rischio per tutti. Il nucleare civile e quello militare finivano quindi per dimostrare di essere nient'altro che le due facce della stessa medaglia.

La "fobia nucleare" raggiunse, in parte a ragione, il culmine nel 1986 con il disastro di Chernobyl : così, dopo l'emergenza ed un periodo di panico, il cd. "effetto Chernobyl" determinò la riduzione dei programmi nucleari in vari paesi ed il blocco totale in Italia. La proibizione di vendere e consumare prodotti ortofrutticoli e caseari freschi – a rischio di contaminazione dalla nube radioattiva – furono i provvedimenti sanitari più restrittivi e severi di tutta l'Europa ed il loro impatto sulla mentalità della popolazione fu quello di aumentare l'insicurezza e l'ostilità verso il nucleare, sentimenti che si esplicitarono nella vittoria dei referendum contro il nucleare.[123]

Da allora, nonostante i tentativi in senso contrario dell'ENEA, l'abbandono del nucleare ha retto fino ad oggi.

Le conseguenze della decisione italiana di disimpegno nucleare hanno fatto sì che il nostro paese si ritrovi a dipendere, dal punto di vista energetico, per oltre l'80% da importazioni di combustibili fossili e di energia elettrica, con un esborso di circa 40 mila miliardi di lire.[124]

Ma ciò che più importa è che, in realtà, il nostro paese non ha affatto rinunciato al nucleare. Infatti, ben il 17% dell'elettricità importata dalla Francia è di origine nucleare. L'Italia dunque ha solo reso l'energia nucleare una nuova fonte di importazione, rinunciando invece alle positive ricadute in termini scientifici, tecnologici, economici ed occupazionali.[125] Si sappia infatti che la costruzione e l'esercizio di una centrale nucleare dà lavoro, nel tempo, a più di 10.000 persone tra operai, tecnici, impiegati scienziati ed ingegneri, senza contare tutte le imprese-satellite che vivono grazie alle necessità dell'impianto. In totale, l'uscita dal nucleare è costata all'Italia ben 120 mila miliardi di lire.

In base a tali considerazioni, viene spontaneo chiedersi come mai nessuno ne abbia enunciato le conseguenze negative. Ebbene, secondo Ugo Spezia, segretario generale dell'Associazione Italiana Nucleare, il motivo è che si tratta di

una situazione che sembra fatta apposta per accontentare tutti. L'elettricità nucleare spedita in Italia costa all'EDF francese circa 7 lire al kWh, […] l'elettricità viene poi ceduta a circa 70 lire al kWh all'ENEL, che in tal modo paga meno di quanto gli costa produrla in proprio con l'olio combustibile o con il gas. […] L'EDF guadagna lautamente; l'ENEL risparmia sui costi di produzione e lucra la differenza sul costo del fatturato all'utenza; petrolieri e gasieri continuano a vendere all'ENEL il gasolio e il gas per far funzionare le centrali termoelettriche; […] e l'erario continua a introitare le

---

[123] Cfr.: Fornaciari P., Il petrolio, l'atomo e il metano. Italia nucleare 1946-1997, 21^mo Secolo, Milano 1997.

[124] Dati aggiornati a novembre 1998.

[125] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21^mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

accise da capogiro che gravano sugli idrocarburi e finanziarsi così in modo 'subliminale', facendo magari il bel gesto di ridurre di 30 lire le tasse sulla benzina…[126]

Sebbene sia innegabile la potenziale rischiosità delle comuni centrali nucleari, che comunque con il passare degli anni sono diventate sempre più sicure, non si può negare la diffusa incompetenza scientifica sull'argomento di un'opinione pubblica informata purtroppo in modo superficiale o unilaterale.

E' dunque in un quadro di forti ostilità e pregiudizi che oggi in Italia si torna a parlare di nucleare, un termine che sembra diventato un tabù, tanto quanto l'idea di energia nucleare. Parlare di nucleare "sicuro e pulito", oggigiorno, in Italia è ancora un'impresa ardua e socialmente rischiosa. Eppure l'EA – italiano di nascita – è proprio questo.

In effetti, bisogna ammettere, sembra che anche in Italia ci sia un timido ritorno del discorso sul nucleare, come indicherebbero le parole dell'ex-ministro dell'Università e della Ricerca Scientifica, on. Colombo: "C'è poi da riprendere in considerazione l'energia nucleare, ora che è possibile analizzarne la sicurezza in termini più pacati e riflessivi di quanto sia accaduto immediatamente dopo Chernobyl. [Infatti] sotto l'aspetto del clima globale, l'energia nucleare è incomparabilmente meno devastante dei combustibili fossili …".[127] Però, in paesi come l'Italia, dove l'opinione pubblica è totalmente, o comunque in buona parte, contraria all'energia dai nuclei, affinché questa fonte diventi socialmente accettabile si dovranno necessariamente verificare alcune condizioni, tra le quali:

- una nuova generazione di reattori dotati di sicurezza passiva e fattibilità tecnico-economica
- una serie di soluzioni tecnologiche più che rassicuranti per tutte le fasi del ciclo nucleare, compresa l'eliminazione delle scorie
- la soluzione al problema della proliferazione degli armamenti
- la competitività con i prezzi delle fonti fossili, nei quali siano però incluse anche le diseconomie relative all'emissione di gas-serra.

Diventa a questo punto naturale constatare come l'EA soddisfi tutte queste condizioni, esso, infatti, ha una serie di sistemi di sicurezza passiva, è fattibile dal punto di vista tecnico ed economico, trova il suo punto di forza nell'eliminazione delle scorie, non produce plutonio utilizzabile per armi nucleari, anzi distrugge quello esistente, e si dimostra competitivo verso le fonti fossili, come dimostrato nelle stime (inoltre ulteriori ricerche ne potranno probabilmente anche diminuire i costi di costruzione, come vedremo nel cap.3).

---

[126] L'ENEL rivende i kWh acquistati dalla Francia a 328 o 145 Lit/kWh agli utenti finali, secondo la fascia oraria. Cfr.: Anonimo, *L'energia nucleare rimane insostituibile anche per l'Italia, Intervista a Ugo Spezia*, in "21mo secolo. Scienza e tecnologia", anno X, n.4, dicembre 1999, pp. 26-34 e sito Internet: http://www.enel.it/home/servizi/tariffe/html/dom_biorario_nj.htm

[127] Cfr.: Sereni V., "Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo, op. cit.

2.6.4 – Le fonti rinnovabili in Italia

Affrontare il discorso delle fonti rinnovabili in Italia risulta invece molto semplice. Basti pensare al consenso generale che esse suscitano nell'opinione pubblica. Ma le cose cambiano drasticamente quando si guarda alla loro applicabilità nel nostro paese.

In ogni caso, in linea con le indicazioni del Libro Bianco della Comunità Europea (novembre 1997) che parlano di raddoppiare entro il 2010 la quota di energia prodotta attraverso le fonti rinnovabili, l'Italia si è posta dei precisi obiettivi espressi nel Libro Verde pubblicato nel luglio 1998. Si tratta di investire 40.000 miliardi di lire per la costruzione di impianti elettrici per 8.500 MW, con l'installazione di 3 milioni di metri quadri di pannelli solari e la produzione di 2 milioni di tonnellate di biocarburanti, in modo da avviare il processo di riconversione del settore energetico dalle fonti fossili a quelle rinnovabili.[128]

Nell'insieme, questi impianti dovrebbero consentire di produrre circa 40 TWh l'anno, con una riduzione delle emissioni di CO_2 per 18 milioni di tonnellate l'anno. Il costo stimato di un chilowattora da fonti rinnovabili nel 2010 è di 130 lire, cioè superiore di 40-60 lire rispetto a quello da impianti termoelettrici.[129] Ma queste fonti diventerebbero competitive nel caso di un costo del carbone di 65-100$ a tonnellata.

Tab. 8 – Fonti rinnovabili in Italia, situazione al 1996 e previsioni per il 2010.

TECNOLOGIA	1996 (Mtep)	2010 (Mtep)
Idroelettrico >10 MW	7,300	7,600
Idroelettrico <10 MW	1,950	2,980
Geotermia (elettr.)	0,830	1,620
Eolico	0,007	1,320
Fotovoltaico	0,003	0,060
Biomasse (elettr.)	0,008	3,300
Rifiuti (elettr.)	0,053	0,990
Geotermia (termico)	0,213	0,400
Solare (termico)	0,007	0,200
Biomasse (termico)	2,150	3,500
Rifiuti (termico)	0,096	0,000
Biocombustibili	0,045	2,000
Totale rinnovabili	12,730	23,970

Fonte: Silvestrini G., *Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra*, in "Le Scienze", n.363, novembre 1998.

[128] Cfr.: De Paoli L., Lorenzoni A. (a cura di), *Economia e politica delle fonti rinnovabili e della cogenerazione*, collana Economia e politica dell'energia e dell'ambiente, Franco Angeli, Milano 1999.

[129] Cfr.: Silvestrini G., *Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra*, in "Le Scienze", n.363, novembre 1999, pp. 78.84. Mentre per un approfondimento sul futuro delle fonti rinnovabili in Italia, cfr.: Silvestrini G., *Il tempo della transizione. Fonti rinnovabili*, in "Galileonet", anno III, n. 10 settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

Più difficilmente realizzabile risulta invece la previsione sull'energia eolica poiché, essendo l'Italia praticamente priva di vento, si potrebbe contare al massimo su 500 MWatt di eolico. Al contrario, la cogenerazione, che ha in sé ottime promesse, svolge un ruolo del tutto secondario (1.200 MWatt) nel piano energetico attuale.[130]

In ogni caso, se l'Italia vuole tener fede agli impegni presi a Kyoto (di ridurre le emissioni di CO_2 del 6,5% rispetto al 1990 entro il 2012) e vuole seguire le indicazioni dell'Unione Europea (che prevede un raddoppio entro il 2010 delle fonti rinnovabili), allora nel nostro paese ci dovrà essere un serio sforzo politico ed economico.

---

[130] Ma in realtà non è una fonte rinnovabile vera e propria, visto che consiste nel generare contemporaneamente energia e vapore (quindi elettricità e energia termica) bruciando determinati combustibili. Cfr. Regge T., *Facciamo i conti in tasca all'energia pulita*, in "Le Scienze", n. 363, novembre 1998.

CAPITOLO 3

COSTI DI GENERAZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA

3.1 – Metodologia dell'analisi

Nell'ultimo decennio vi è stata un'inversione di tendenza all'interno del settore energetico. Infatti, fino al 1989, la fonte che si presentava ovunque più vantaggiosa era il nucleare, questo soprattutto grazie alla superiorità tecnologica di questo settore, a previsioni di alti costi del carbone e ad una relativa immaturità tecnica degli impianti a gas. Ma, durante gli anni '90, le centrali alimentate a gas si sono dimostrate sempre più competitive, nei confronti di quelle a carbone e nucleari, conoscendo così una notevole espansione come fonti di energia primaria.

Per comprendere fino in fondo questa inversione di tendenza è necessario ricordare i numerosi cambiamenti, economici e politici, avvenuti negli anni '90, che si sono riflettuti anche sulle risorse energetiche e sui metodi di generazione. Questi sviluppi sono stati: globalizzazione dell'economia e quindi accesso a nuovi fornitori di combustibili e a nuovi acquirenti di energia, tendenza del mercato elettrico verso la liberalizzazione (allontanamento dal monopolio sia della generazione sia della distribuzione di elettricità) e privatizzazione, maggiore severità nei regolamenti per la produzione di elettricità ai fini della salvaguardia di salute e ambiente.

È altresì interessante notare come i costi di generazione attesi[131] abbiano avuto, dal 1992 ad oggi, un *trend* decrescente per tutte le fonti energetiche, sebbene vi siano notevoli differenze nelle previsioni dei singoli paesi e nei riferimenti alle diverse tecnologie. In particolare si può notare dai dati di due studi dell'IEA[132] – 1992 e 1997 – come vi sia stata una riduzione dei costi molto alta per gli impianti a gas (16-54%), sebbene non siano trascurabili neppure quelle per gli impianti a carbone (3-34%) o nucleari (2-27%).

Chiaramente, anche nella valutazione dei costi di generazione attesi influiscono numerosi fattori, tra i quali diversi gradi di sviluppo regionali, preferenze ed opposizioni dell'opinione pubblica verso certi tipi di impianti, sicurezza dei rifornimenti energetici, attenzione per l'ambiente, influenza del governo nella scelta dei combustibili o delle tecnologie e negli ordinamenti energetici, e quindi limiti espliciti, leggi di monopolio, tasse e sussidi.

Eppure un aspetto comune a tutti i paesi dell'OCSE negli ultimi anni c'è stato: un esiguo numero di ordini per impianti energetici di grossa taglia. In effetti, ciò è dovuto principalmente ad una capacità

---

[131] Ci si riferisce a risorse e tecnologie energetiche che saranno commercialmente disponibili nei prossimi 10-15 anni e che abbiano raggiunto un livello di sviluppo industriale tale da permettere stime dei costi affidabili.

[132] Cfr.: Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, OECD Publications, Paris Cedex 1998.

produttiva maggiore della domanda e ad un tasso di crescita medio annuo della capacità di generazione negli impianti già esistenti del 2%.

Anche la sempre crescente attenzione nei confronti dell'ambiente – sia a livello di inquinamento locale che di riscaldamento del pianeta - ha portato a seri mutamenti, in quanto oggi tutte le centrali a combustibili fossili devono avere dei dispositivi per la riduzione delle emissioni di gas nocivi nell'atmosfera[133]. Per questo motivo è facile prevedere che tutte le fonti e tecnologie che si mostreranno più sicure per l'ambiente aumenteranno progressivamente la loro quota di mercato.

La maggiore attenzione verso l'ambiente ha poi portato, negli ultimi anni, a cercare di valutare ed internalizzare i costi esterni della generazione di elettricità. Infatti, i costi riportati in genere includono i costi sostenuti dai produttori per adattarsi alle norme esistenti in materia ambientale, ai regolamenti contro l'inquinamento atmosferico per gli impianti a combustibili fossili ed alle normative di sicurezza per le centrali nucleari.

In particolare le restrizioni sulle emissioni di anidride carbonica hanno la possibilità di influenzare grandemente i costi comparati delle diverse fonti elettriche. Infatti, tutte le restrizioni ed i costi aggiuntivi da esse imposti avrebbero l'effetto di internalizzare efficacemente i costi ambientali relativi al loro contributo al riscaldamento globale. Esattamente come le normative sugli ossidi di zolfo e azoto, anche quelle sul biossido di carbone porterebbero dei vantaggi economici a tutte quelle fonti energetiche che o producono una minore quantità di gas inquinanti o hanno costi più bassi per le tecnologie di controllo delle emissioni.[134]

Bisogna anche ammettere che lo sviluppo di un mercato mondiale dell'energia avrà come effetto più probabile quello di aumentare la stabilità dei prezzi dell'energia e di garantire la sicurezza degli approvvigionamenti di combustibile, almeno nel medio periodo.[135] Viene così a cadere uno degli argomenti a favore delle fonti non-fossili, basato sull'andamento sempre crescente dei prezzi dei combustibili fossili, sebbene questa ipotesi possa considerarsi valida nel lungo periodo all'avvicinarsi del momento in cui si esauriranno.

Infine, un ruolo significativo nei costi, attuali ed attesi, di generazione di energia elettrica è stato giocato dal progresso tecnico ed in particolare da: un aumento dell'efficienza ed una riduzione dei costi di capitale degli impianti a gas; uno sviluppo delle centrali a carbone, di tipo avanzato, con equipaggiamenti di controllo sulle emissioni nocive; una crescita degli impianti di generazione di elettricità che usano energie rinnovabili; un aumento della sicurezza e miglioramento delle prestazioni delle centrali nucleari.

---

[133] In particolare si tratta di dispositivi per il controllo dell'inquinamento che riducono la materia parcellizzata e le emissioni di ossido di zolfo e di azoto.

[134] Ma per effettuare un paragone valido sarebbe necessario internalizzare i costi esterni relativi ad ogni stadio del ciclo energetico, dalla costruzione dei macchinari a quello degli impianti a quello dello generazione di energia, altrimenti alcune fonti (soprattutto le rinnovabili) ne risulterebbero ingiustamente valorizzate.

[135] Cfr.: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. Update 1998, op. cit.

Onde poter paragonare i costi attesi sono state formulate delle ipotesi *standard*:[136]

- uno stesso giorno di entrata in servizio degli impianti (il primo gennaio 2005) necessario per armonizzare i costi di investimento ed i costi dei combustibili con la vita media degli impianti stessi, e per restringere il campo alle fonti energetiche ed alle tecnologie che potranno effettivamente operare per quella data;
- una comune vita media per gli impianti di 40 anni, per paragonare i costi di generazione di elettricità. Va comunque tenuto presente che, nel caso delle centrali nucleari ed a carbone, la vita media economica è generalmente superiore a questo termine, con l'effetto di ridurre i costi medi, inoltre le tecnologie ad alta intensità di capitale, come il nucleare, ne sono particolarmente dipendenti. Invece, nel caso di impianti con una vita inferiore ai 40 anni, i costi di rinnovamento e di sostituzione sono inclusi nelle stime;
- uno stesso fattore di carico[137] stabilizzato al 75% ottenuto con 5.000, 6.000 e 6.626 ore di funzionamento a piena potenza rispettivamente nel primo, secondo e terzo anno di vita dell'impianto. In genere si hanno delle riduzioni nei costi di generazione con fattori di carico più elevati.

Le ipotesi nazionali, invece, dipendono dalla vita attesa dell'impianto, dalle previsioni sui prezzi di combustibili e dalle numerose altre variabili che conseguono dalle diverse regolamentazioni vigenti in ogni paese.[138]

I costi che influenzano direttamente la competitività delle diverse centrali energetiche sono: costi di investimento, costi di esercizio e manutenzione, costi del combustibile, costi per il controllo dell'inquinamento, costi del trattamento dei rifiuti ed altri costi relativi a misure di protezione della salute e dell'ambiente. Inoltre vengono comprese nei costi anche le tasse specifiche per l'impianto (che possono variare da paese a paese ed a seconda dell'impianto), così come le tasse sui combustibili che ne influenzano il prezzo d'acquisto pagato dai produttori di energia. Infine, i costi calcolati si riferiscono all'energia netta prodotta e fornita alla rete di distribuzione, e non quindi al costo sostenuto dai consumatori finali. Vengono di conseguenza esclusi i costi di connessione alla rete, anche perché essi sono simili per tutti i tipi di impianti e quindi non influenzano la competitività delle diverse fonti; ciò però potrebbe non essere vero nel caso delle rinnovabili a causa della loro particolarità.

---

[136] Cfr.: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. Update 1998, op. cit.
[137] Il fattore di carico, o fattore di utilizzazione, è il rapporto tra un carico (potenza) elettrico medio ed il carico di punta, generalmente calcolato su un periodo di un'ora.
[138] Cfr.: Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, OECD Publications, Paris Cedex 1998.

Ma, prima di passare all'analisi specifica per ogni fonte energetica, è opportuno specificare esattamente quali costi devono esser presi in considerazione e da cosa essi siano costituiti.

I costi di investimento comprendono: l'interesse durante la costruzione, anche notturna, calcolato ad un tasso di sconto annuo del 5 e 10%, le sopravvenienze passive (*contingency*); i principali rinnovamenti, come ad esempio la sostituzione dei generatori di vapore; il *decommissioning*[139] ed infine i cosiddetti "altri costi".
Più in particolare, nei costi d'investimento abbiamo:

- i costi diretti: preparazione del sito, lavoro, materiale, equipaggiamento e manodopera;
- i costi indiretti: progetto e supervisione ingegneristica, equipaggiamenti e funzionamento temporaneo, spese amministrative *in situ*;
- i costi del proprietario: amministrazione generale, pre-esercizio, R&S, pezzi di ricambio, ricerca del luogo, ottenimento dei permessi e pubbliche relazioni, tasse;
- per il nucleare: 1) altri costi di capitale *overnight*: primo inventario dell'acqua pesante, rinnovamenti principali, crediti; 2) *decommissioning*: progetto, ottenimento delle licenze e relazioni pubbliche, smantellamento e immagazzinamento delle scorie, smaltimento delle scorie, restauro del luogo;
- per impianti a carbone e gas: altri costi di capitale *overnight*: rinnovamenti principali, *decommissioning*, altri;
- contingenza.

I costi di esercizio e manutenzione (O&M: O*peration and Maintenance*) comprendono i costi di: esercizio, manutenzione (materiali, manodopera, servizi), *staff* ingegneristico di supporto, amministrazione, spese generali per i servizi centrali, tasse e dazi (specifici per l'impianto), assicurazioni (specifiche per l'impianto), rinnovamenti principali, smaltimento delle scorie, altri costi, ed in più, solo per il nucleare: monitoraggio del sito, supporto alle direttive regolamentari e sicurezza.

I costi del combustibile includono tutti i costi relativi al combustibile al momento in cui viene acquistato dall'impianto. Dunque vi è incluso il prezzo delle materie prime e il costo del trasporto. Nel caso delle centrali nucleari si tiene anche conto del costo *front-end* e *back-end* del ciclo

---

[139] Il termine *decommissionig*, usato abitualmente nel settore nucleare, indica il processo di chiusura di un impianto nucleare di qualunque tipo, in modo da fornire l'adeguata protezione dalle radiazioni e da impedire la contaminazione radioattiva dell'ambiente.

dell'uranio, mentre per le centrali a carbone e a gas si comprendono anche i costi delle infrastrutture necessarie al trasporto.

I tassi di sconto netti del 5% e 10% annui usati influenzano fortemente i costi di investimento e di conseguenza i costi totali. Il motivo per cui, nelle valutazioni economiche sulla generazione di energia elettrica, si usano questi tassi è che essi rispecchiano l'ambito di valori nei quali si trovano realmente i produttori di elettricità. Per semplicità, poi, si è ipotizzato che i tassi di sconto siano uguali ai tassi di interesse.[140]

Infine, onde poter paragonare i costi di generazione tra le varie fonti convenzionali e l'*Energy Amplifier*, si sono elaborati i dati reperiti nello studio della NEA, portando la vita economica degli impianti a 50 anni (periodo di vita posto dal CERN per l'EA) ed ipotizzando che il costo di generazione per ogni impianto diminuisca, tra i 40 e i 50 anni di vita, della stessa percentuale in cui era diminuito tra i 30 e i 40 anni.[141]

3.2 – Analisi dei costi degli impianti a carbone

Le tecnologie più comuni per gli impianti a carbone o a lignite sono sicuramente quelle con le caldaie convenzionali, anche se esistono degli impianti integrati a gasificazione del carbone.[142] Sebbene la potenza dei singoli impianti vari tra i 100 MWe e i 1.000 MWe, essi hanno generalmente una taglia media con una potenza di circa 500 MWe e la loro efficienza termica netta è normalmente vicina o superiore al 40%.

3.2.1 – Costi di investimento attesi per gli impianti a carbone

In tutti i paesi OCSE i costi di costruzione *overnight* per gli impianti a carbone sono minori rispetto agli stessi costi per le centrali nucleari. Quasi dovunque, questi costi sono compresi tra i 1.000 e i 1.350 $/kWe. Al limite inferiore troviamo il Canada con un costo atteso di 837 $/kWe per quattro impianti a combustione di carbone polverizzato da 750 MWe ciascuno, costruiti sullo stesso sito, mentre al limite superiore ci sono il Giappone e Portogallo con costi attesi attorno ed oltre i 2.000 $/kWe. Infine, per i costi di costruzione attesi per gli impianti in fase di sviluppo, si ha che essi sono

---

[140] Per un'analisi approfondita di ognuno di questi costi si cfr.: NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, op. cit.

[141] In realtà la diminuzione del costo totale tra i 40 e i 50 anni dovrebbe essere maggiore, poiché l'ammortamento è già terminato e dunque l'impianto opera in attivo su tutte le spese sostenute. Ma, d'altra parte, potrebbero intervenire costi di manutenzione e di sostituzione dei pezzi, per cui ci è sembrata logica l'ipotesi di mantenere costante la percentuale di diminuzione dei costi totali.

[142] Si tratta della conversione del carbone in prodotti gassosi attraverso la reazione con aria, ossigeno, vapore, biossido di carbonio o loro miscele.

generalmente maggiori di quelli delle centrali più tradizionali. Nei paesi non-OCSE, invece, i costi di costruzione *overnight* vanno dai 772 $/kWe della Cina ai 1.258 $/kWe del Brasile.

Nel caso degli impianti a carbone, i costi di *decommissioning* sono generalmente considerati trascurabili, in quanto essi sono talmente bassi da essere largamente compensati dagli introiti provenienti dalla vendita del sito e dei materiali riutilizzabili recuperati nel processo di chiusura dell'impianto.

I costi di rinnovamento si hanno quando la vita economica media dell'impianto è minore della durata media ipotizzata di 40 anni; essi comunque influiscono solo per pochi punti percentuali, sui costi d'investimento totali standardizzati, ad un tasso di sconto annuo del 10%, mentre sono inferiori al 18% per un tasso di sconto del 5%.

Infine, la programmazione delle spese in conto capitale è compresa tra i quattro e gli otto anni in tutti i paesi, indipendentemente dal tipo di impianto a carbone scelto ed essa è in genere più breve di quella delle centrali nucleari.

Tab. 9 – Costi d'investimento attesi.

Paese	Ipotesi nazionali US$/kWe		Ipotesi *standard* USmill/kWh			
	Tasso del 5%	Tasso del 10%	Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Belgio	1.523	1.671	13,32	33	25,38	48
Canada 1	1.133	1.164	9,91	34	17,68	48
Canada 2	1.804	1.872	15,78	38	28,42	52
Danimarca	1.447	1.574	12,65	34	23,90	49
Finlandia	983	1.039	8,60	27	15,77	40
Francia	1.584	1.770	13,85	30	26,88	45
Italia	1.365	1.490	11,94	28	22,63	43
Olanda	1.494	1.635	13,07	29	24,82	44
Spagna	1.490	1.671	13,03	31	25,38	46
USA	1.277	1.348	11,20	45	20,54	59
Media	1.410	1.523	12,34	33	32,90	47

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998,* IEA Publications, Paris Cedex, 1998.

Concludendo, dunque, vediamo che i costi totali d'investimento risultano in media attorno ai 1.410$ per chilowatt installato, nelle previsioni nazionali, e a 12,34 millesimi di dollaro per chilowattora prodotto nelle previsioni *standard*, al tasso di sconto del 5%; il costo minore per kWe e per kWh è quello della Finlandia (983$/kWe). Sebbene qui non considerato, il costo maggiore in assoluto tra i paesi OCSE è in Giappone (2.739$/kWe e 56,39USmill/kWh), mentre, tra i paesi non-OCSE è in Brasile (1.735$/kWe e 15,18USmill/kWh) al tasso del 5%. Infine, i costi d'investimento, nel caso del carbone, influiscono in media per il 33% sul costo totale dell'impianto ad un tasso di sconto del 5%, mentre influiscono per il 47% ad un tasso del 10%.

Deborah Sessano

3.2.2 – Costi di esercizio e manutenzione attesi per gli impianti a carbone

Nei paesi OCSE, i costi di O&M (*Operation and Maintenance*) variano tra i 26,01 $/kWe di potenza netta all'anno del Canada e i 66,80 del Belgio, con l'unica eccezione del Giappone e del Portogallo dove essi sono pari, rispettivamente, a 81,33 $/kWe e a 74,76 $/kWe. Nei paesi non-OCSE, invece, i costi di esercizio e manutenzione sono inferiori, andando dai 17,5 $/kWe per potenza netta all'anno del Brasile ai 36,05 $/kWe della Cina.

Tab. 10 – Costi di esercizio e manutenzione.

Paese	Ipotesi nazionali $/kWe potenza netta all'anno	Ipotesi *standard* USmill/kWh			
		Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Belgio	66,80	10,27	26	10,40	20
Canada 1	26,01	4,00	14	4,05	11
Canada 2	50,55	7,77	19	7,87	15
Danimarca	43,87	6,75	18	6,83	14
Finlandia	57,71	8,87	28	8,99	23
Francia	64,43	9,91	21	10,03	17
Italia	39,75	6,11	14	6,19	12
Olanda	53,35	8,20	18	8,31	15
Spagna	39,72	6,11	14	6,18	11
USA	33,50	5,15	21	5,22	15
Media	47,57	7,31	19	7,41	15

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

Si noti come i costi di O&M influiscano solo per il 19%, in media, sui costi totali di generazione di elettricità ad un tasso di sconto del 5% e per il 15% ad uno del 10%. Infine, sebbene i *range* dei costi attesi di O&M per gli impianti nucleari e a carbone si sovrappongano, essi sono generalmente inferiori per le tecnologie a carbone, con l'unica eccezione di Francia e Finlandia.

3.2.3 – Prezzi attesi del carbone

Nei paesi OCSE, i prezzi attesi del carbone acquistato dagli impianti – se si esclude la produzione nazionale di lignite – variano da 1,06 $/GJ[143] degli USA a 2,78 $/GJ di Italia e Olanda. Per i paesi al di fuori dell'OCSE, invece, tali prezzi vanno da 1,28 $/GJ del Brasile a 3,23 $/GJ sempre per il Brasile, ma con riferimento ad un diverso tipo di impianto. Soltanto alcuni paesi hanno ipotizzato prezzi stabili per tutta la vita economica della centrale elettrica, mentre gli altri hanno fornito stime dei costi attesi per il 2045 che mostrano un incremento (con un tasso di crescita annuo dello 0,3%), con l'unica eccezione degli Stati Uniti, dove invece scendono.

---

[143] I prezzi sono espressi in Joule per rispecchiare il vero contenuto energetico del carbone, tenendo conto dei diversi valori calorifici dei vari tipi di carbone. Mentre per calcolare i costi di generazione attesi standardizzati si sono usati i prezzi espressi in kWh, onde poterli confrontare con gli altri costi.

Tab. 11 – Prezzi attesi del carbone nel 2005 e 2045 in $/GJ (stime nazionali).

Paese	Belgio	Canada	Danimarca	Finlandia	Francia	Italia	Olanda	Spagna	USA
2005	2,00	1,64	2,40	1,67	2,64	2,78	2,78	2,36	1,06
2045	2,00	1,64	2,40	1,67	2,64	3,05	3,00	2,36	0,80

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

Si noti poi la grande influenza che ha il costo del combustibile sul costo totale degli impianti a carbone, coprendo, in media, il 48% del costo finale per un tasso di sconto del 5% ed il 37% per un tasso del 10%. La considerazione che, al diminuire del tasso di sconto, aumenta la quota dei costi finali da addebitarsi al carbone, ci sarà poi utile per affrontare il paragone tra questa fonte e il nucleare, e, infine, tra il carbone e l'*Energy Amplifier*.

Tab. 12 – Costi del combustibile (USmill/kWh) e percentuale dei costi totali di generazione (ipotesi standard).

Paese	Belgio	Can. 1	Can. 2	Dan.	Finl.	Francia	Italia	Olanda	Spagna	USA	Media
t. del 5%	16,69	15,30	17,90	18,17	14,35	22,62	24,19	23,58	23,11	8,70	18,46
% su C_{TOT}	41	52	43	48	45	49	57	53	55	35	48
t. del 10%	16,69	15,30	17,90	18,17	14,35	22,62	23,91	23,36	23,11	8,95	18,44
% su C_{TOT}	32	41	33	37	37	38	45	41	42	26	37

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.2.4 – Costi totali per gli impianti a carbone

A questo punto possiamo calcolare i costi totali delle centrali a carbone, secondo le ipotesi *standard* di una vita dell'impianto di 40 anni, con un fattore di carico del 75%, e di un'entrata in servizio al primo gennaio del 2005.

Così facendo, si ottiene che il costo totale di generazione più basso, ad un tasso di sconto del 5% lo si trova negli USA (25,01 USmill/kWh), mentre il più alto è in Francia (46,38 USmill/kWh), da paragonarsi con un costo totale medio pari a 38,10 USmill/kWh. Sempre negli stessi paesi si ha che anche ad un tasso del 10% il costo totale sarà, rispettivamente, il maggiore (59,54 USmill/kWh) ed il minore (34,63 USmill/kWh), contro una media di 47,70 USmill/kWh.

Tra i paesi OCSE qui non considerati avremmo, invece, il costo totale più alto in assoluto è in Giappone (55,81 USmill/kWh). Per le nazioni non-OCSE il *range* è tra i 31,82 USmill/kWh della Cina e i 56,45 USmill/kWh del Brasile, per un tasso di sconto del 5%, mentre per un tasso del 10% si hanno gli impianti cinesi con i costi di generazione più bassi (39,96 USmill/kWh) e le centrali brasiliane con i costi più alti (61,80 USmill/kWh).

Tab. 13 – Costi di generazione totali in USmill/kWh (ipotesi standard).

Paese	C_{TOT} al tasso del 5%	C_{TOT} al tasso del 10%
Belgio	40,28	52,47
Canada 1[144]	29,21	37,03
Canada 2	41,45	41,45
Danimarca	37,56	48,90
Finlandia	31,82	39,11
Francia	46,38	59,54
Italia	42,24	52,73
Olanda	44,85	56,48
Spagna	42,24	54,67
USA	25,01	34,63
Media	38,10	47,70

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.3 – Analisi dei costi degli impianti a gas naturale

Gli impianti di questo tipo hanno generalmente delle turbine a gas a ciclo combinato (cioè alla normale centrale a turbogas viene aggiunto un gruppo a vapore in modo da recuperare parte del calore residuo e generare, contemporaneamente, energia elettrica e termica) ed hanno una potenza di circa 350 MWe. Esistono però anche impianti con turbine a gas che usano gas naturale liquefatto (soprattutto Giappone e Corea). L'efficienza termica è solitamente del 50%, e proprio per tale motivo essi stanno ottenendo un sempre maggior riconoscimento all'interno del mercato energetico, tanto che si ritiene che vi sarà un forte aumento della domanda di questo genere di centrali nel prossimo futuro.[145]

3.3.1 – Costi di investimento attesi per gli impianti a gas naturale

Generalmente, i costi di costruzione *overnight* per le centrali a metano sono molto inferiori rispetto agli stessi costi per gli impianti nucleari o a carbone. Questi costi sono inferiori a 800 $/kWe in quasi tutti i paesi OCSE e non (uniche eccezioni sono la Danimarca ed il Giappone), sia per le centrali tradizionali che per quelle in fase di sviluppo. Anche in questo caso, come per il carbone, i costi di *decommissioning* sono trascurabili in quanto talmente bassi da essere facilmente recuperabili.

Invece, hanno qui una particolare importanza i costi di rinnovamento, necessari per la sostituzione di alcune componenti principali degli impianti dopo circa 20-25 anni. Tali costi variano sensibilmente a seconda del paese, andando dal 2 al 27% dei costi d'investimento totali per un tasso di sconto del 5%, e dall'1 al 13% per un tasso del 10%.

[144] Con Canada 1 si intende far riferimento a 4 impianti a combustione di carbone polverizzato e con Canada 2 a combustione in letto fluidizzato di carbone.

[145] Per una spiegazione più approfondita del funzionamento degli impianti a gas e a ciclo combinato si consulti l'appendice.

Infine, la programmazione delle spese in conto capitale varia tra i due ed i sei anni, essendo così molto più breve di quella per le centrali nucleari o a carbone in tutti i paesi, tranne la Spagna dove i tempi di costruzione sono più lunghi.

Tab. 14 – Costi di investimento attesi.

Paese	Ipotesi nazionali US$/kWe		Ipotesi *standard* USmill/kWh			
	Tasso del 5%	Tasso del 10%	Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Belgio	820	884	7,18	20	13,42	32
Canada	752	733	6,58	22	11,13	34
Danimarca 1[146]	887	971	7,76	17	14,74	28
Danimarca 2	920	957	8,04	16	14,52	25
Finlandia	689	727	6,03	17	11,03	27
Francia	923	918	8,07	17	13,94	26
Italia	691	732	6,04	13	11,11	22
Olanda	871	909	7,62	18	13,80	29
Spagna	753	854	6,58	14	12,97	24
USA	502	509	4,39	16	7,73	28
Media	781	819	6,83	17	12,44	28

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.3.2 – Costi di esercizio e manutenzione attesi per gli impianti a gas naturale

I costi attesi di esercizio e manutenzione per gli impianti a gas variano tra i 13,04 $/kWe di potenza netta all'anno del Canada e i 45,32 $/kWe del Belgio, con l'unica eccezione della Finlandia, dove essi sono di ben 70,63 $/kWe, attestandosi così ad un livello superiore di quello previsto – nello stesso paese – per gli impianti nucleari ed a carbone. Se si considerassero anche i paesi OCSE esterni all'Europa e al Nord America, allora, si avrebbe un *range* di costi d'esercizio e manutenzione attesi compreso tra i 6,07 $/kWe della Turchia e i 51,11 $/kWe del Giappone. Anche i costi previsti nelle nazioni non-OCSE sono compresi all'interno di questo *range* e dunque, in questo caso, non si rilevano particolari differenziazioni tra i paesi dell'organizzazione e quelli ad essa esterni.

---

[146] Con Danimarca 1 si intende un impianto a ciclo combinato e con Danimarca 2 un impianto a caldaia.

Tab. 15 – Costi attesi di O&M.

Paese	Ipotesi nazionali $/kWe potenza netta all'anno	Ipotesi *standard* USmill/kWh			
		Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Belgio	45,32	6,97	19	7,06	17
Canada	13,04	2,01	7	2,03	6
Danimarca 1	27,80	4,28	10	4,33	8
Danimarca 2	37,05	5,70	11	5,77	10
Finlandia	70,63	10,86	30	11,00	27
Francia	28,53	4,39	9	4,44	8
Italia	16,94	2,61	6	2,64	5
Olanda	24,59	3,78	9	3,83	8
Spagna	31,37	4,82	10	4,88	9
USA	18,09	2,78	10	2,82	10
Media	31,34	4,82	12	4,88	11

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.3.3 – Prezzi attesi del gas naturale

Al momento in cui gli impianti dovrebbero entrare in funzione, secondo le previsioni nazionali si avrebbe un prezzo del gas naturale variabile tra gli 1,6$/GJ negli USA e i 5,35$/GJ in Italia. Mentre Belgio, Finlandia, Francia e Spagna hanno ipotizzato che il prezzo del combustibile resti invariato per tutta la vita economica dell'impianto e allo stesso livello del 1996, la Danimarca, invece, ha previsto un aumento del prezzo del gas fra il 1996 ed il 2005 (da 3,06 a 5,20$/GJ), dopodiché il prezzo si mantiene costante fino al 2045. In tutti gli altri paesi è stato immaginato un aumento nel costo di questo combustibile ad un tasso medio annuo dello 0,8%. Infine, dovunque si è previsto che il prezzo del gas naturale, nel 2005 sarà tra le 1,2 e le 3 volte maggiore del prezzo del carbone nello stesso periodo.

Tab. 16 – Prezzi attesi del gas naturale in $/GJ.

Paese	Belgio	Canada	Danimarca	Finlandia	Francia	Italia	Olanda	Spagna	USA
2005	3,19	2,05	5,20	2,96	5,05	5,35	4,24	5,17	1,58
2045	3,19	3,96	5,20	2,96	5,05	5,62	4,87	5,17	6,44

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

Di nuovo, come nel caso del carbone, si vede che il costo del combustibile copre un alta percentuale del costo totale di generazione di elettricità, con un limite inferiore del 53% in Finlandia ed uno superiore dell'81% in Italia, ad un tasso di sconto del 5%. Tale percentuale sarebbe più alta di tre punti solo in Turchia, mentre anche per i paesi non-OCSE il rapporto tra il costo del gas e quello totale resterebbe all'interno del suddetto *range*[147].

[147] Sembra utile far notare che anche per gli impianti alimentati a petrolio la percentuale del costo del combustibile sul costo totale di generazione d'elettricità sarebbe all'interno di questo *range*, con una media di circa il 60%.

Tab. 17 – Costi del combustibile (USmill/kWh) e percentuale dei costi totali di generazione (ipotesi standard).

Paese	Belgio	Canada	Dan. 1	Dan. 2	Finl.	Francia	Italia	Olanda	Spagna	USA	Media
t. del 5%	21,84	21,45	32,87	37,47	19,03	34,96	37,90	31,22	36,50	19,97	29,32
% su C_{TOT}	61	71	73	73	53	74	81	73	76	74	71
t. del 10%	21,84	19,88	32,87	37,47	19,03	34,96	37,57	30,68	36,40	16,82	28,75
% su C_{TOT}	52	60	63	65	46	66	73	64	67	61	62

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.3.4 – Costi totali per gli impianti a gas naturale

A questo punto calcoliamo i costi totali di generazione dell'energia elettrica e vediamo che, ad un tasso di sconto del 5%, il limite inferiore sarà dato dai 27,14 USmill/kWh degli Stati Uniti e quello superiore dai 51,21 USmill/kWh della Danimarca con il suo secondo tipo di impianto a gas, mentre la media sarà di 40,97 USmill/kWh. Ad un tasso del 10%, il costo più basso sarà di 27,37 USmill/kWh sempre negli USA, il costo più alto di 57,77 USmill/kWh nel secondo impianto della Danimarca, contro una media di 46,09 USmill/kWh. All'interno dei paesi OCSE, comunque, il valore maggiore in assoluto sarebbe quello del Giappone tanto per un tasso di sconto del 5% (79,10 USmill/kWh) quanto per uno del 10% (84,40 USmill/kWh). Mentre, nei paesi non-OCSE i costi sarebbero comunque compresi all'interno del suddetto *range*.

Tab. 18 - Costi di generazione totali in USmill/kWh (ipotesi standard).

Paese	C_{TOT} al tasso del 5%	C_{TOT} al tasso del 10%
Belgio	35,99	42,33
Canada	30,03	33,04
Danimarca 1	44,90	51,94
Danimarca 2	51,21	57,77
Finlandia	35,92	41,07
Francia	47,42	53,35
Italia	46,55	51,32
Olanda	42,62	48,31
Spagna	47,91	54,36
USA	27,14	27,37
Media	40,97	46,09

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.4 Analisi dei costi degli impianti nucleari

Gli impianti nucleari più comuni in Occidente sono i BWR, i reattori ad acqua bollente, e i PWR, cioè i reattori ad acqua pressurizzata, questi ultimi poi usano talvolta l'acqua pesante come refrigerante. Sarà su questi due tipi di centrali nucleari che vergerà l'analisi che segue.

3.4.1 – Costi di investimento attesi per gli impianti nucleari

I costi di investimento costituiscono, a seconda dei paesi, circa il 50-70% del costo finale del kWh. I costi di investimento sono generalmente costituiti, tra gli altri, dai costi istantanei di capitale (cioè i costi che riguardano direttamente la costruzione di una centrale) e dagli interessi passivi (dati dal capitale immobilizzato tra l'inizio della costruzione ed il momento di entrata in servizio della centrale), chiaramente questi ultimi aumentano al crescere del tempo necessario alla costruzione e all'avvio dell'impianto.

Al contrario i costi diretti devono le loro diversità, da paese a paese, ai differenti costi dei fattori (terra, manodopera, materiali, ecc.) e alle varie procedure regolamentari (identificazione dei siti, scelte dei progetti, ottenimento dei permessi, ecc.).[148] Si è comunque notato che dove si è seguita una politica di standardizzazione delle centrali e/o della loro costruzione in serie su uno stesso sito, sono state ottenute delle notevoli economie, si pensi ad esempio alla Francia ed al Canada.

Tab. 19 – Costi istantanei e costi di capitale.

Paese	Costi istantanei ($/kWe)	Interessi passivi ($/kWe)
Canada	1.138	169
Finlandia	1.387	217
Francia	1.093	171
Olanda	1.414	219
Regno Unito	1.828	420
Spagna	2.060	374
Stati Uniti	1.406	296

Fonte: Anonimo, *Relazione introduttiva*, in Spezia, U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano, 1999, pp. 11-48.

I costi totali di costruzione *overnight* nei paesi OCSE vanno da meno di 1.500 $/kWe degli Stati Uniti per un impianto ancora in fase di sviluppo a più di 2.000 $/kWe in Finlandia e Spagna per impianti tradizionali. Per i paesi non-OCSE è interessante notare il bassissimo costo cinese, pari a soli 1.020 $/kWe.

I costi di *decommissioning* variano sensibilmente da paese a paese, in quanto dipendono grandemente da regolamentazioni, *standard* e schemi contabili nazionali. In ogni caso, nei paesi OCSE, i costi di *decommissioning* influiscono sui costi di investimento totali standardizzati solo per una minima parte e precisamente per poco meno dell'1% ad un tasso di sconto annuo del 10% e per poco più ad un tasso di sconto del 5%, infatti al livello mondiale sono l'1,191% e a livello europeo lo 0,675% dei costi totali d'investimento.

[148] Cfr.: Anonimo, *Relazione introduttiva*, in Spezia, U. (a cura di), op. cit.

Infine, la programmazione delle spese in conto capitale varia ampiamente – tra i quattro e i nove anni – a seconda del paese, influenzando significativamente gli interessi durante la costruzione ed i costi di generazione standardizzati.
Ora sommando tutti questi elementi otteniamo i costi di investimento totali, il minore dei quali lo si ha in Finlandia (1.878 $/kWe) ed il maggiore in Spagna (2.540 $/kWe), contro una media di 2.190 $/kWe, ad un tasso del 5%, sebbene il maggiore in assoluto sarebbe in Giappone (2.848 $/kWe). Tra i paesi non-OCSE, invece, i prezzi sono inclusi in un *range* che varia tra i 1.801 $/kWe in Romania e i 2.275 $/kWe in Brasile. Con l'unica eccezione della Cina, paese in cui si hanno i minori costi di investimento in assoluto, pari infatti a soli 1.386 $/kWe.

Tab. 20 – Costi d'investimento attesi.

Paese	Ipotesi nazionali US$/kWe		Ipotesi *standard* USmill/kWh			
	Tasso del 5%	Tasso del 10%	Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Canada 1	2.139	2.384	18,71	63	36,20	77
Canada 2[149]	1.878	2.053	16,43	67	31,17	79
Finlandia	2.516	2.672	22,01	59	40,56	73
Francia	1.988	2.280	17,39	54	34,61	70
Spagna	2.540	2.957	22,21	54	44,90	70
USA_P[150]	2.079	2.065	18,20	55	31,38	68
Media	2.190	2.402	19,16	59	36,47	73

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.4.2. – Costi di esercizio e manutenzione attesi per gli impianti nucleari

Nei paesi OCSE, i costi di esercizio e manutenzione attesi nel 2005 variano tra i 38,82 $/kWe di potenza netta all'anno del Canada e i 57,63 $/kWe degli USA, sebbene i costi maggiori in assoluto si abbiano in Giappone (109,50 $/kWe). Nei paesi non-OCSE, invece, i costi di O&M sono generalmente inferiori (tra i 29 e i 43 $/kWe), tranne che per la Romania (75,05 $/kWe) e la Cina[151] (57,56 $/kWe).
Si noti come, nel caso del nucleare, i costi di O&M costituiscano solo il 24% dei costi totali, mentre la maggior parte del carico finanziario è da addebitarsi ai costi di investimento..

---

[149] Con Canada 1 si intendono due PHWR con una potenza di 665 MWe ciascuno, mentre con Canada 2 ci si riferisce a due PHWR con una potenza di 881 MWe l'uno.
[150] Si usa il nome di USA_P per un impianto di tipo PWR non esistente, ma previsto entro il 2005.
[151] Per un reattore PHWR/Candu6, il cui costo dovrebbe diminuire dai 57,56 $/kWe del 2005 ai 40,61 del 2025, per rimanere poi costante in seguito.

Tab. 21 – Costi di O&M attesi.

Paese	Ipotesi nazionali $/kWe potenza netta all'anno	Ipotesi *standard* USmill/kWh			
		Tasso del 5%	% del C_{TOT}	Tasso del 10%	% del C_{TOT}
Canada 1	54,94	8,45	29	8,55	18
Canada 2	32,82	5,97	24	6,05	15
Finlandia	51,68	7,95	21	8,05	14
Francia	44,06	6,77	21	6,86	14
Spagna	52,95	8,14	20	8,25	13
USA_P	57,63	8,86	27	8,97	19
Media	49,01	7,69	24	7,79	16

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.4.3 – Prezzi attesi dell'uranio e costo del ciclo del combustibile

I costi attesi del combustibile nucleare riguardano il suo ciclo pre-reattore e sono composti dal costo dell'uranio, dell'arricchimento e della fabbricazione. Questi costi, pur essendo maggiori dell'attuale prezzo di mercato dell'uranio, sono comunque simili ai prezzi di contratto.

Ora, mentre per la maggior parte dei paesi OCSE il prezzo atteso dell'uranio, è compreso tra i 41,8 e i 65,2 $/kgU rispettivamente del Canada e della Francia, e vale l'ipotesi di stabilità per tutta la vita economica della centrale, per altre nazioni esterne all'OCSE il prezzo del combustibile subirà delle variazioni. L'India considera che esso rimarrà costante a 168,3 $/kgU, il Brasile, invece, ritiene che esso aumenterà da 43,9 $/kgU nel 1996 a 53,8 $/kgU nel 2045.

Tab. 22 – Prezzi attesi dell'uranio in $/kg.

Paese	Canada	Finlandia	Francia	Spagna*	USA_P
2005	41,8	n. p.	65,2	1559,9	n. p.
2045	41,8	n. p.	65,2	1559,9	n. p.

Note: n. p. = non pervenuto
* costo totale dell'uranio arricchito
Fonte: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity, op. cit.

I costi aggregati del ciclo del combustibile nucleare comprendono il prezzo dell'uranio ed i servizi di *back-end* e *front-end* e sono calcolati per chilowattora. Essi costituiscono, nel caso dei LWR, una quota tra il 13 ed il 29% dei costi totali di generazione standardizzati e tra l'8 e il 23% per i PHWR, ad un tasso di sconto netto annuo del 5%. Mentre, con un tasso del 10% essi risultano essere tra l'8 ed il 18% per i LWR e tra il 5 ed il 14% per i PHWR dei costi totali.

Tab. 23 - Costi del combustibile (USmill/kWh) e percentuale dei costi totali di generazione (ipotesi standard).

Paese	Tasso del 5%	% su C_{TOT}	Tasso del 10%	% su C_{TOT}
Canada 1	2,42	8	2,49	5
Canada 2	2,27	9	2,34	6
Finlandia	7,32	20	7,32	13
Francia	8,07	25	7,69	16
Spagna	10,69	26	10,69	17
USA_P	6,22	19	5,81	13
Media	6,17	18	6,06	12

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

Le previsioni sull'andamento del costo del ciclo del combustibile nucleare mostrano un *trend* decrescente dovuto in particolar modo sia alla maggiore efficienza nello sfruttamento dell'uranio e nelle *performance* dei reattori, sia alla diminuzione attesa nei prezzi dell'uranio e dei servizi relativi al ciclo dell'uranio. In effetti, negli ultimi anni si è avuta una diminuzione nel costo dei servizi del ciclo di combustibile e, talvolta, anche una loro stabilità, dovuta al fatto che, sebbene il costo dell'uranio sia aumentato sul mercato, il prezzo medio pagato dalle centrali per la fornitura sotto contratti a lungo termine è rimasto stabile in termini reali.[152]

Contrariamente a ciò che capita per i combustibili fossili, soltanto un terzo del costo del combustibile nucleare acquistato dalle centrali dipende dal prezzo dell'uranio in sé. Infatti, i restanti due terzi sono dovuti ai costi di arricchimento e conversione (solo per i PWR) e di fabbricazione (sia per i PWR che per i reattori di tipo Candu, cioè i reattori su disegno canadese), operazioni che generalmente vengono fatte da due imprese diverse.

Recentemente i prezzi della conversione sono diminuiti tanto sul mercato a breve che a lungo termine, grazie soprattutto all'arrivo del plutonio proveniente dallo smantellamento dell'arsenale nucleare.[153] Per ciò che riguarda l'arricchimento, invece, ci sono state tendenze contrastanti; da una parte l'eccesso di capacità produttiva ha portato ad una diminuzione dei prezzi di contratto, dall'altra le incertezze nel settore hanno aumentato i prezzi a breve termine a partire dal 1991, è comunque opinione diffusa che nel medio periodo i costi dell'arricchimento scenderanno.

Tab. 24 – Componenti del costo del combustibile nucleare.

Componenti	PWR	Candu
Uranio	35%	54%
Conversione	4%	Non necessario
Arricchimento	40%	Non necessario
Fabbricazione	21%	46%

Fonte: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity, op. cit.

[152] Per ulteriori informazioni sugli aspetti economici del ciclo dell'uranio si veda OECD/NEA, *The economics of the nuclear fuel cycle*, Paris, 1994.
[153] Cfr.: Anonimo, *Physics of Plutonium Recycling*. *Introduction*, NEA. Sito Internet: http://nea.fr/html/science/wppr/intro.htm

Sicuramente una delle principali caratteristiche del mercato del combustibile nucleare è stata, nel passato, la poca trasparenza, dovuta al fatto che il produttore vendeva il combustibile a centrali da lui progettate, mentre oggi si assiste ad un aumento della competitività proprio perché il carburante può essere utilizzato in numerosi sistemi tra loro diversi.

Dunque, sebbene vi siano numerosi motivi per cui risulta difficile prevedere l'andamento futuro del mercato del combustibile nucleare, quelli universalmente riconosciuti come i più importanti sono:

- l'influenza negativa delle decisioni politiche sulla competitività;
- la persistente mancanza di un pareggio tra la produzione ed il consumo di uranio;
- la tendenza generale all'introduzione ed allo sviluppo di una maggiore concorrenza in tutti gli stadi del mercato di fornitura del combustibile nucleare.

Nel caso del nucleare, comunque, il costo del combustibile incide solo per una bassa percentuale, variabile tra il 15 ed il 30%, sul costo del kWh prodotto.

Si parla in genere di costi *front-end* per intendere i costi del ciclo pre-reattore: il prezzo dell'uranio ed i costi di conversione, arricchimento e fabbricazione. E di costi *back-end* per quelli legati alla parte finale del ciclo, una volta che il combustibile irraggiato è stato estratto dal reattore; essi comprendono i costi di: trasporto e stoccaggio del combustibile esaurito, di riprocessamento e vetrificazione, di condizionamento e smaltimento del carburante, di smaltimento delle scorie.

In caso di ritrattamento del combustibile irraggiato, si avrà che l'influenza sul costo totale del combustibile ($7{,}7 \cdot 10^{-3}$ \$/kWh), è pari al 74,5% per i costi *front-end*, al 33,4% per quelli *back-end* e al –7,9% per l'accredito sull'uranio recuperato. Mentre nel caso di smaltimento diretto[154] del combustibile esaurito, la loro influenza sul costo totale ($6{,}7 \cdot 10^{-3}$ \$/kWh) è dell'85,5% per i costi *front-end* e del 14,5% per quelli *back-end*, non essendoci alcun accredito per l'uranio recuperato.[155]

Come si può notare non vi è una soluzione che si distingua in particolar modo quanto a vantaggi economici. Sia il ritrattamento che lo smaltimento diretto sono piuttosto a basso costo, inoltre bisogna ricordare che esistono ancora delle incertezze (±10%) sui costi di stoccaggio, per i quali vi è un'esperienza limitata e la mancanza di un mercato specifico.[156] Attualmente dunque, le decisioni riguardo al ritrattamento o meno del combustibile dipendono soprattutto dalla volontà di diminuire le importazioni di combustibile e le scorie da gestire. Resta, comunque, sottinteso che un eventuale

---

[154] Il ritrattamento è un processo in cui il combustibile già usato viene manipolato onde estrarne una parte di nuovo utilizzabile, mentre lo smaltimento diretto consiste nel mandare allo stoccaggio il combustibile usato così com'è.

[155] Cfr. la tabella 6, pp.22 in: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

[156] In particolare il ritrattamento ha un costo che varia tra le 1,8 lire e le 12 lire per kW/h, a seconda di chi ne parla; inoltre, tale costo potrebbe diminuire ancora di un 30% se nel processo di ritrattamento ci si accontentasse di ripulire le scorie del 90% del loro plutonio, invece che del 99,9% come accade oggi. Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

aumento del costo dell'uranio e/o dell'arricchimento si tradurrebbe in vantaggio economico dell'opzione di ritrattamento.

3.4.4 – Costi totali per gli impianti nucleari

Di nuovo possiamo passare all'aggregazione dei costi di investimento, di esercizio e manutenzione e del combustibile, per arrivare ai costi totali per gli impianti nucleari.

Come si vede, al tasso di sconto del 5%, il paese dove una centrale nucleare ha il costo maggiore in assoluto in termini di chilowattora prodotto è la Spagna (41,01 USmill/kWh), mentre il costo minore è in Canada, per il reattore di tipo due, (24,67 USmill/kWh), contro una media di 33,01 USmill/kWh. Tra gli altri paesi OCSE, il Giappone sarebbe la nazione in cui la generazione di energia elettrica costa di più (57,45 USmill/kWh), mentre al di fuori dell'OCSE tutti i paesi avrebbero dei costi totali compresi nel suddetto *range*. Passando ad un tasso del 10% la situazione internazionale resterebbe immutata, avendo soltanto un aumento dei costi per ogni impianto.

Resta infine da notare come in Francia ed in Canada, l'elettricità prodotta con il nucleare abbia un costo inferiore a quello medio dei paesi qui considerati.

Tab. 25 - Costi di generazione totali in USmill/kWh (ipotesi standard).

Paese	C_{TOT} al tasso del 5%	C_{TOT} al tasso del 10%
Canada 1	**29,57**	**47, 24**
Canada 2	**24,67**	**39,56**
Finlandia	**37,28**	**55,93**
Francia	**32,24**	**49,15**
Spagna	**41,04**	**63,83**
USA_P	**33,27**	**46,13**
Media	**33,01**	**54,27**

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.5 – Analisi dei costi dell'*Energy Amplifier* [157]

Secondo alcune stime economiche preliminari portate avanti dal gruppo di Rubbia al CERN, il costo del chilowattora elettrico prodotto con l'*Energy Amplifier* risulta generalmente minore rispetto a quello prodotto con altre fonti più convenzionali. Per correttezza d'analisi bisogna comunque dire che le previsioni dei costi fornite nel rapporto del CERN (*A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, 1996) sono soltanto indicative, poiché sono state elaborate su *design*

[157] Le stime date qui di seguito costituiscono un'elaborazione delle valutazioni date in Fernàndez R., Mandrillon P., Rubbia C., Rubio J.A., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, CERN/LHC/96-01 (EET), CERN, Geneva 1996, dove i costi per il progetto specifico dell'EA sono stati valutati in base all'esperienza derivante da installazioni convenzionali di generazione d'energia. Non è stata formulata alcuna ipotesi di inflazione e dunque i tassi di interesse sul capitale sono considerati "*above-inflation*", cioè sono tassi di sconto netti.

concettuale. Per tale motivo è necessario ricordare che un'esatta valutazione economica dell'EA richiederebbe un progetto ingegneristico completo e definitivo dell'impianto, progetto tuttora in fase di definizione. Infatti, solo a fine anno l'*équipe* di Rubbia presenterà una valutazione economica aggiornata del sistema, che per allora avrà probabilmente raggiunto la forma progettuale definitiva.

In letteratura, poi, si sono trovate solo altre due stime dell'*Energy Amplifier* (nel rapporto Pooley ed in quello dello STOA[158]), ma entrambe non sono utilizzabili ai nostri fini per due motivi principali: prima di tutto perché forniscono solo un'indicazione dei costi finali dell'impianto (non rendendo quindi possibile il paragone per ogni stadio della produzione di elettricità), ma soprattutto perché sono basate su valutazioni di massima del sistema nel suo insieme, e non sull'analisi di ogni suo singolo componente.

Le stime qui di seguito, dunque, debbono essere valutate e considerate alla luce di quanto detto, ricordando che esse sono state utilizzate poiché sono le uniche attualmente disponibili e che potrebbero non rispecchiare esattamente i reali costi del progetto definitivo, ai quali si perverrà solo quando vi sarà la decisione effettiva di costruire il primo impianto ad uso commerciale.[159]

Infine, preme chiarire che le stime qui riportate si riferiscono unicamente ad un impianto finalizzato al commercio e non ad un prototipo. In particolare, si farà riferimento ad un'unità da 1500 MWatt termici, vale a dire circa 675 MWatt elettrici.[160]

Come nel caso di ogni impianto di generazione di energia, i costi debbono essere divisi in varie sezioni:

- i costi d'investimento diretto, che derivano dalle componenti tecniche costituenti l'EA. Poiché in alcuni casi esistono varie opzioni tecnologiche possibili, mentre in altri i macchinari devono essere completamente sviluppati sulla base di quelli esistenti, vi sono degli ampi margini di incertezza;
- i costi d'investimento indiretto, che influiscono sui costi del ciclo del combustibile e sui costi diretti, e che sono dati principalmente dal costo del capitale immobilizzato finché l'impianto non è pronto a produrre energia. Ecco dunque che l'interesse sul capitale, e di conseguenza il tasso di sconto netto, qui considerati uguali per semplicità, diventano determinanti;

---

[158] Per una trattazione di questi rapporti si rimanda al cap. 5, par. 5.4.1 e 5.4.3.

[159] Inoltre sarebbe per noi stato impossibile fornire una nostra valutazione poiché non vi è ancora completa chiarezza su alcune componenti dell'EA e dunque non si sarebbe potuta dare una valutazione finale del progetto.

[160] In particolare si parla di un impianto da 675 MWatt di energia elettrica primaria e ad una temperatura di circa 550/600 °C, con un'efficienza termodinamica pari a circa 45% e sostanzialmente più alta di quella di un PWR. Inoltre, è anche stato valutato che la concentrazione di tre unità, per la produzione di circa 1900 MWe complessivi, ridurrebbe i costi di circa un 15-20%. Per le stime economiche di un prototipo di EA si rimanda a Fernàndez R., Mandrillon P., Rubbia C., Rubio J.A., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, CERN/LHC/96-01 (EET), CERN, Geneva 1996.

– altri costi d'investimento indiretti riguardano il *design* e l'architettura dal punto di vista ingegneristico, la supervisione e il coordinamento del lavoro sul sito, le questioni amministrative, ecc.;[161]
– i costi di esercizio e manutenzione sono basati sui requisiti operativi dei sottosistemi dell'impianto e sulle sue previste condizioni di operatività;
– i costi del combustibile, che includono tutte le operazioni concernenti il combustibile, dipendono dal prezzo di mercato del combustibile grezzo e dai successivi passaggi del ciclo del combustibile, per i quali esiste una vasta esperienza nei PWR.

3.5.1 – Costi di investimento attesi per l'*Energy Amplifier*

I costi d'investimento diretti

I costi d'investimento diretti totali sono dati da quelli riferiti a diversi sistemi. L'unità di generazione dell'energia (l'*Energy Generating Unit*, EGU) in cui è incluso il circuito primario. La sua funzione principale è quella di produrre energia termica per fissione del combustibile nel nocciolo. Tale energia viene poi estratta attraverso la convezione naturale del piombo fuso, con il vantaggio di ridurre i costi diretti come capita anche grazie ad altri sistemi di sicurezza passiva. Le dimensioni totali dell'EGU sono state ipotizzate essere di 8m. di diametro e 36m. di altezza e il suo peso totale di circa 10.500 ton. La stima fornita per l'EGU, tenuto conto di tutti i suoi elementi costitutivi, è di 58,98 M$, con margini di incertezza tra i 45,61 e i 67,51 M$.[162]
Il circuito secondario trasporta il calore dagli scambiatori primari di calore all'alimentatore di vapore della turbina. Di nuovo, tenendo conto di tutti i vari componenti, il suo costo è di circa 59,55 M$, con margini di incertezza tra i 45,69 e i 72,21 M$.
Il sistema dell'acceleratore è concepito per produrre un fascio di protoni con un'energia cinetica di 1 GeV e con un'intensità nominale di 12,5 mA. L'efficienza totale attesa è del 40%. Il costo totale dell'acceleratore, dei necessari sistemi di schermatura e di raffreddamento e di ogni altro componente è stato stimato in circa 184,45 M$. È però il caso di ricordare che, fino ad oggi, gli acceleratori sono sempre stati costruiti con fini di ricerca e dunque con vincoli finanziari certamente stringenti, ma non come nel caso di una loro produzione industriale a fine commerciale. Proprio per tale motivo è lecito ritenere che la stima di costo qui fornita possa essere diminuita nel caso di un utilizzo su larga scala dell'EA.

---

[161] In realtà si dovrebbe anche tener conto dei costi di smantellamento (*decommissioning)* dell'impianto, ma, poiché esso non è ben determinato neppure per i normali reattori nucleari, e come per essi, sembra incidere solo in minima parte sui costi totali di investimento, esso era stato qui ritenuto trascurabile nelle stime fornite dal CERN, ma verrà aggiunto più tardi nel calcolare i costi totali dell'EA per completezza di analisi. Si veda nota 163.
[162] Per un'analisi dettagliata dei costi dei principali componenti dell'EGU e dei successivi sistemi qui elencati, cfr.: Fernàndez R., et al., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, op. cit.

L'assemblaggio dell'EGU, del sistema dell'acceleratore e del circuito secondario dovrebbe avere un costo, come normalmente capita nel caso dei sistemi già definiti, pari a circa il 25% del costo totale degli elementi assemblati. Si avrebbe così un costo di 37,88 M$, con un'incertezza del ± 20% in base alla complessità e esperienza nell'assemblare sistemi simili.

La strumentazione ed il controllo includono i sistemi di protezione, la stanza di controllo, il monitoraggio e la diagnostica, la protezione da incendi, ecc. La stima data è di 35 M$, con margini di incertezza tra i 28 e i 42 M$.

I sistemi ausiliari, che provvedono al riscaldamento e *dumping* del piombo, del piombo-bismuto e al riscaldamento e compressione dell'elio, hanno un costo totale di 7.69 M$, con un *range* tra i 6,15 e i 9,23 M$.

Il trasformatore converte il calore, trasportato dal vapore, in elettricità e trasforma la potenza elettrica nel voltaggio adeguato alla rete elettrica esterna. Il costo totale di questi macchinari è di 233,5 M$ (*range* 210,15 – 256,85 M$) inclusi i costi di assemblaggio.

Le strutture ed il lavoro civile**.** Le strutture ospitano tutti i componenti dell'EA con la sicurezza richiesta e tutti i servizi necessari al funzionamento dell'impianto. Anche se per fare una stima esatta del loro costo sarebbe necessario conoscere il sito destinato e le caratteristiche specifiche per il progetto, si può comunque prevedere che la semplicità globale dell'EA (funzionamento e manutenzione) ed il basso numero di personale necessario – secondo le previsioni del CERN – permettano alcuni risparmi, con un costo di 175 M$ ed un *range* tra i 140 – 210 M$.

La stima totale dei costi d'investimento diretti, per il prototipo è così riassumibile: miglior stima 792,05 M$, limite inferiore 671,35 M$ e limite superiore: 920,35 M$. Il corrispondente costo diretto d'investimento per kWe installato è di 1331$/kWe (*range*: 1128 – 1547 $/kWe).

E' poi importante notare che le suddette valutazioni potrebbero diminuire sia per l'uso di un *Energy Amplifier* di maggiore potenza (per es. a tre stadi), sia per una produzione in serie di EA. Similmente a quanto accade per un qualsiasi impianto soggetto ad industrializzazione, vi sarebbe cioè una riduzione dei costi dal prototipo alla testa di serie (prototipo industriale) e un'altra riduzione da questa alle unità di serie. Uno scenario "pessimistico" prevede una diminuzione dei costi di circa il 15% tra il prototipo industriale e la produzione di serie, sia per l'EGU sia per l'acceleratore. Mentre tra il primo prototipo e quello industriale si prevede una riduzione dei costi del 45% per il sistema di accelerazione e niente per l'EGU data la semplicità e "classicità" del suo *design*. Se si accettano queste ipotesi, secondo il rapporto del 1996, la stima dei costi diretti diventa di 655,13 M$ (con un *range* di 552,82 – 758,68 M$) e quella per kWe installato risulta 1.101 $/kWe (*range*: 929 – 1.275 $/kWe).

Deborah Sessano

I costi d'investimento indiretti e gli altri costi.

<u>I costi indiretti</u> sono dati dall'interesse sul capitale immobilizzato e accumulato nel periodo tra il momento iniziale dell'investimento e quello in cui l'impianto comincia a funzionare. È stato ritenuto, dal gruppo del CERN, che il tempo necessario alla costruzione di un EA (come impianto industriale in serie) non debba essere diverso da quello di un PWR, e cioè 5-7anni. Si è anche immaginato che la programmazione degli investimenti sia simile a quella dei PWR, eventualmente aggiustata alla scala di tempo scelta.

Ora, ipotizzando un tasso di sconto del 5% ed un periodo di costruzione di 5 anni, i costi d'investimento indiretti sarebbero pari a 72,98 M$ (*range*: 61,58 – 84,51 M$).

<u>Gli altri costi d'investimento</u> dipendono soprattutto dalle caratteristiche del sito (dal punto di vista geologico), dalle leggi della nazione specifica, ecc. Comunque, in base alle esperienze in altri settori energetici, si è giunti ad una stima di 196,54 M$ (*range* 157,23 – 235,85 M$) per un'unità di EA in serie.

A questo punto, il totale dei costi indiretti e degli altri costi d'investimento, con un aggiuntivo 2,5% per tener conto dei costi dei pezzi di ricambio, arriverebbe ad essere pari a 285,89 M$ (*range*: 235,19 – 336,74 M$) con un margine di incertezza del 15% circa.

I costi d'investimento totali.

I costi totali d'investimento, per un'unità di EA prodotta in serie, sono dati dalla somma dei costi d'investimento diretti, indiretti e degli altri costi, per un totale di 941,02 M$ (pari a 11,00 USmill/kWh), con un limite inferiore di 788,01 M$ ed uno superiore di 1095,42 M$, e con un costo per kWe installato di 1.582 $ (*range*: 1.324 – 1.841 $/kWe installato).

Tab. 26 – Costi d'investimento totali per l'EA.

Componenti	Miglior stima	Limite inf.	Limite sup.
Investimenti diretti (M$)	655,13	552,82	758,68
Investimenti indiretti e altri costi (M$)	285,89	235,19	336,74
Totale (M$)	941,02	788,01	1095,42
Totale ($/kWe)	1582	1324	1841

Fonte: Fernàndez R., Mandrillon P., Rubbia C., Rubio J.A., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, CERN/LHC/96-01 (EET), CERN, Geneva, 1996.

Certamente tali costi sembrano eccessivamente "ottimistici" se paragonati ai 2.190 $/kWe della media dei paesi OCSE europei. Non altrettanto si può dire nel caso in cui si guardi alla Cina, che ha previsto, per un reattore tradizionale, i costi d'investimento più bassi in assoluto: 1.386 $/kWe.

3.5.2 – Costi di esercizio e manutenzione attesi per l'*Energy Amplifier*

Tali costi coprono i costi della manutenzione e dei consumi e riguardano: il sistema di accelerazione, l'EGU, il circuito secondario e il classico macchinario meccanico ed elettrico, il personale ed altri servizi necessari al funzionamento dell'impianto.

Per quanto concerne il sistema di accelerazione, in base alle esperienze degli acceleratori nel campo della ricerca pura, si è arrivati ad una stima corrispondente ad un 5% del costo totale (il che significa una sostituzione completa ogni 20 anni) e cioè a circa 4,31 M$. Per l'EGU, ricordando che sarà aperto ogni 5 anni per essere ricaricato di combustibile, si arriva ad un costo di 3,1 M$. Per il circuito secondario ed i sistemi elettrici convenzionali si è fatta una stima di 14 M$ all'anno. Per quanto riguarda il personale, è stato calcolato dal CERN che uno staff totale di un centinaio di persone sarebbe sufficiente a far funzionare l'*Energy Amplifier*, con una spesa annua di circa 7 M$. Infine si può aggiungere 1 M$ per i servizi più generali.

Quindi i costi di esercizio e manutenzione annui dell'EA risulterebbero di 29,41 M$, con un'incertezza del 20%, ed il loro contributo al costo del kWh prodotto sarebbe pari a 6,30 USmill/kWh.

Tab. 27 – Costi di O&M.

Componenti	Acceleratore	EGU	Circuito secondario e sistemi elettrici	Personale	Altri servizi	Totale
Costo (M$)	4,31	3,1	14	7	1	29,41

Fonte: Fernàndez R., et al.., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op.cit.

3.5.3 – Costi attesi del ciclo del combustibile

Qui di seguito vengono riportati i costi del combustibile per un'unità *standard* di EA, un PWR ed una coppia PWR-EA, così come elaborati dal gruppo del CERN.[163]

Si segue la linea normale, che divide i costi del ciclo del combustibile in costi *front-end* (relativi al combustibile prima della sua immissione nell'impianto) e costi *back-end* (relativi all'estrazione del combustibile dal nocciolo). È tuttavia bene precisare che le stime date potrebbero subire delle serie variazioni qualora si passasse alla fase sperimentale, poiché finora il torio non è mai stato utilizzato come combustibile nucleare e dunque esistono diverse incertezze riguardo il suo ciclo.

I costi *front-end* (per un PWR e per un EA, con l'uso del torio, invece dell'uranio) comprendono: il costo diretto d'acquisto dell'uranio naturale e/o del torio, il costo diretto della conversione dell'uranio, il costo diretto d'arricchimento, il costo diretto della fabbricazione del combustibile e i

[163] La coppia PWR-EA è stata proposta come metodo per l'eliminazione definitiva delle scorie provenienti dai tradizionali reattori nucleari.

costi indiretti, dovuti sia al tempo che intercorre tra l'acquisto dell'uranio e la sua preparazione, prima che il combustibile venga caricato nel reattore, sia al ritardo nella produzione di energia a causa del caricamento del combustibile.

I costi *back-end* comprendono due operazioni principali che, a seconda della scelta sul destino del combustibile consumato sono: i costi diretti in caso di riprocessamento (trasporto del combustibile usato, riprocessamento e vetrificazione, smaltimento delle scorie), i costi diretti in caso di smaltimento immediato (trasporto e immagazzinamento del combustibile consumato, incapsulamento e smaltimento) e i costi indiretti, per entrambi i casi, dovuti ai ritardi nelle operazioni di *back-end* per la rimozione del combustibile consumato dall'impianto.

Tab. 28 – Costo unitario del combustibile ($/kg U) e costo del ciclo del combustibile (USmill/kWh).

Componente	Costo ($/kg U)
Front-end	1.247,4
Back-end	973,0
Costi indiretti	76,5
Totale	2.296,9
Costo del ciclo del combustibile	2,68 USmill/kWh

Fonte: Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

Ma, nel caso di un *Energy Amplifier* associato ad un normale PWR si potrebbe ottenere una leggera diminuzione dei costi del combustibile rispetto agli stessi sia costi dell'EA da solo sia del PWR da solo, in quanto non sarebbe più necessario (dopo la prima volta) acquistare l'uranio né arricchirlo poiché esso sarebbe prodotto dall'EA.

Ora, secondo le stime fatte dal CERN nel 1996 basato su dati del 1992, il costo del combustibile nei PWR era pari a 11,19 USmill/kWh e quello dell'EA associato al PWR (PWR-EA) era di 10,76 USmill/kWh, la differenza (0,43 USmill/kWh) essendo data dall'assenza dei costi relativi all'uranio, mentre tutti gli altri costi restano uguali in entrambi i casi.[164] Secondo i dati aggiornati al 1998[165], la media del costo del combustibile da noi ottenuta per i PWR è di 6,17 USmill/kWh, in questo caso, ipotizzando che la differenza resti uguale poiché diminuiscono i costi comuni ad entrambi gli impianti, il costo del ciclo di combustibile per un PWR-EA sarebbe di 5,74 USmill/kWh.

Si ricordi, infine, che il principale combustibile dell'EA è il torio. Ma nel caso di un EA associato ad un PWR, per l'eliminazione del combustibile usato e dei residui prodotti dal secondo, il costo della sostituzione del combustibile (uranio-233) è paragonabile a quello del normale combustibile arricchito (uranio-235).

---

[164] Cfr.: Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

[165] Cfr.: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. Update 1998, op. cit.

Concludendo, per l'EA il costo totale del ciclo del combustibile è di 2.296,9 $/kg U e il contributo del ciclo del combustibile al costo dell'energia è di 2,68 USmill/kWh. Inoltre, usando il ciclo combinato PWR-EA, il contributo del combustibile al costo dell'energia per l'EA e per il PWR sono essenzialmente gli stessi che se i due reattori operassero indipendentemente. I margini di incertezza sono di circa il 19%.

3.5.4 – Costi totali dell'*Energy Amplifier*

Un parametro essenziale per valutare il costo energetico dell'EA è la vita utile dell'installazione. In base alle scelte tecniche fatte è stata prevista una vita media di 50 anni per ogni unità di EA, ma potrebbe essere anche più lunga tenendo conto che durante questo periodo esso necessita solo di operazioni minime quali la ricarica del combustibile ogni cinque anni e la sostituzione dell'acceleratore ogni venti. Per la stime del costo dell'energia si è considerato un EA, con una vita di t = 50 anni e un tasso di sconto netto a prezzi costanti che varia tra il 5 e il 10%. Il valore di riferimento è quello tipico per i paesi OCSE del 5%. La vita ridotta, S, dell'installazione, che corrisponde ad un costo annuo di 1/S, è data dalla formula:

$$S = \frac{1- (1+r)^{-t}}{r}$$

Quindi, con un tasso di sconto netto r = 0,05, otteniamo che S = 18,3 anni e che il costo di investimento annuo è pari al 5,4% del costo d'investimento totale.

Nello studio del CERN i costi totali dell'EA erano di 19,90 USmill/kWh. A questi si è qui ritenuto opportuno aggiungere i costi di *decommissioning*[166], i quali, per i paesi OCSE da noi trattati, costituiscono circa lo 0,7% dei costi di investimento totali, arrivando così, per l'*Energy Amplifier*, a 20,08 USmill/kWh, onde poter procedere ad un paragone con le fonti energetiche precedentemente studiate. Mentre se si usasse la percentuale media mondiale (1,191%), i costi totali dell'EA sarebbero di 20,14 USmill/kWh.

Tab. 29 - Costi di generazione totali in USmill/kWh.

Componenti	Miglior stima	Limite inf.	Limite sup.
Investimento	11,08	9,27	12,90
O&M	6,30	5,00	7,50
Combustibile	2,70	2,40	2,90
Totale	20,08	16,67	23,30

Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da Fernàndez, et al., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, op. cit.

.

[166] Secondo quanto si può ricavare elaborando i dati in Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, OECD Publications, Paris Cedex 1998. Sul perché erano stati esclusi in precedenza si veda la nota 158.

Il costo totale del kWh per un'unità di serie dell'EA verrebbe così ad essere 20,08 USmill/kWh; su di esso influiscono:

- per quasi il 60%, i costi d'investimento (ad un tasso di sconto netto del 5 %, mentre in caso di un tasso più elevato, aumenterebbero anch'essi);
- per il 30% circa, le spese per l'esercizio e la manutenzione[167];
- per il restante 10%, il ciclo del combustibile.

Si può dire che, in generale, tale risultato è simile a quanto accade per i normali PWR, diversamente invece a ciò che capita per gli impianti a carbone, dove gli investimenti sono circa il 20 – 40% del costo totale, e gli impianti a metano, dove sono circa il 10 – 25%.

Dunque, anche per l'*Energy Amplifier*, come per le centrali nucleari, il costo del chilowattora è fortemente dipendente dal tasso di sconto netto che influisce sugli investimenti. Un cambiamento nel tasso dal 5 al 10% implica un aumento dei costi d'investimento di circa il 60%.

Concludendo, le proprietà economiche dell'EA, basate sul progetto del 1996, sono definite da:

- un costo per unità di 941 M$ (*range*: 788 – 1095 M$);
- un costo d'investimento per kWe installato di 1582 $ (*range*: 1324 – 1841);
- un costo energetico di 20,08 USmill/kWh (*range*: 16,67 – 23,30 USmill/kWh);
- una tipica distribuzione del costo dell'energia tra investimenti, O&M e costo del combustibile di, rispettivamente, 55%, 31% e 14%.[168]

3.6 – Paragone tra le diverse fonti

3.6.1 – Confronto tra i costi d'investimento attesi

In linea generale si può affermare che i costi totali di investimento attesi sono minori per gli impianti a gas che per quelli nucleari o a carbone, tanto per un tasso di sconto netto annuo del 5% che per uno del 10%.

Si noti che, come già detto, per il nucleare sono proprio i costi d'investimento ad incidere maggiormente sui costi totali; mentre, nel caso del carbone e del metano è il costo del combustibile ad incidere, rispettivamente, per il 48% e 71% sui costi totali. Ciò nonostante, il costo totale dell'elettricità prodotta dall'*Energy Amplifier* sembrerebbe restare competitivo.[169]

---

[167] Tanto le spese per il funzionamento e la manutenzione dell'impianto, quanto i costi derivanti dal ciclo del combustibile, tendono a diminuire al crescere del tasso di sconto netto.

[168] Tutti i valori qui riportati si riferiscono ad un tasso di sconto netto del 5%, come quello normalmente utilizzato nelle valutazioni dei paesi OCSE.

[169] Per una stima dei costi di generazione attesi da alcune fonti rinnovabili si consulti l'appendice. Qui si è preferito ometterli vista la difficoltà nel reperimento di dati affidabili.

È comunque necessario ricordare che la forte discordanza tra i costi di investimento totali, anche per tecnologie simili, tra i diversi paesi è dovuta soprattutto a differenti caratteristiche strutturali, e principalmente: costo del lavoro, prezzi interni per materiali ed equipaggiamenti, le strutture istituzionali e regolamentari, infrastrutture e condizioni specifiche del sito.

Tab. 30 – Costi d'investimento medi e loro percentuale sui costi totali nelle diverse fonti.

Fonte*	Costi di investimento (USmill/kWh)	Percentuale sui costi totali
Carbone	12,34	33
Gas	6,83	17
Nucleare	19,16	59
Energy Amplifier	11,08	60

Nota: * dal confronto vengono escluse le fonti rinnovabili a causa della irreperibilità di dati da fonti ufficiali e dunque per l'impossibilità di condurre un paragone fondato su stime attendibili.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. e da Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

3.6.2 – Confronto tra i costi di esercizio e manutenzione attesi

Per tutte le tecnologie si ritiene che i costi di esercizio e manutenzione rimangano gli stessi, a prezzi costanti, durante tutta la vita economica dell'impianto; ciò è vero per ogni paese, tranne quelli dove essi aumenterebbero per gli impianti a gas (Ungheria),per gli impianti a gas ed a carbone (Russia) per tutti i tipi di impianti (Brasile), e, infine, per la Cina, dove ci si attende una loro diminuzione nel caso di un particolare tipo di centrale nucleare.[170] In ogni caso, è possibile notare come i costi di O&M varino ampiamente tra i diversi paesi anche se riferiti a tecnologie simili, ciò è dovuto a numerosi fattori, tra cui: salario dello staff, produttività e norme.

Tab. 31 – Costi medi di O&M e loro percentuale sui costi totali nelle diverse fonti energetiche.

Fonte*	Costi di O&M (USmill/kWh)	Percentuale sui Costi totali
Carbone	7,31	19
Gas	4,82	12
Nucleare	7,69	24
Energy Amplifier	6,30	30

Nota: * dal confronto vengono escluse le fonti rinnovabili a causa della irreperibilità di dati da fonti ufficiali e dunque per l'impossibilità di condurre un paragone fondato su stime attendibili.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. e da Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

[170] Si tratta di un impianto di tipo PHWR/Candu6, cioè *Pressurized Heavy Water Reactor* (reattore ad acqua pesante pressurizzata). Cfr.: NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.6.3 – Confronto tra i costi attesi del ciclo del combustibile

Da quanto visto finora è facile notare come i costi del combustibile costituiscano un'alta percentuale del costo totale per gli impianti a combustibili fossili. In particolare essi incidono fortemente sulle centrali a gas (71%) e a petrolio (circa il 60%), sebbene queste ultime non siano qui state trattate.

Da ciò risulta chiaro come nel momento in cui il prezzo del petrolio e, di conseguenza, quello del gas naturale – che, come abbiamo già avuto modo di dire, sono legati – aumentano, la generazione di energia elettrica dai combustibili fossili diventa tutt'altro che competitiva. Dunque, in un momento come quello attuale, dove il prezzo del petrolio è salito del 150% in poco più di un anno, l'elettricità prodotta da fonti diverse da metano e olio combustibile ha nettamente ripagato gli investimenti fatti negli anni passati, come è successo in Francia, la quale deve all'energia nucleare il 76% della produzione nazionale di energia.

Tab. 32 – Costi medi del combustibile e loro percentuale sui costi totali nelle diverse fonti.

Fonte*	Costi del combustibile (USmill/kWh)	Percentuale sui costi totali
Carbone	18,46	48
Gas	29,32	71
Nucleare	6,17	18
Energy Amplifier	2,70	10

Nota: * dal confronto vengono escluse le fonti rinnovabili a causa della irreperibilità di dati da fonti ufficiali e dunque per l'impossibilità di condurre un paragone fondato su stime attendibili.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, Projected costs of generating electricity, e da Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

Il costo del combustibile dell'EA (2,70 USmill/kWh) sarebbe così circa due volte minore di quello medio dei normali reattori, ma comunque superiore a quello previsto dal Canada (2,27 USmill/kWh) per il suo PHWR.

3.6.4 – Confronto tra i costi totali di generazione

Recentemente varie organizzazioni internazionali hanno svolto delle valutazioni per comparare i costi di generazione centrali nucleari rispetto a quelli delle centrali a carbone commissionate negli anni Novanta.

Come si può notare dalla tabella 33, ad un tasso del 5%, l'opzione nucleare si rivela la più vantaggiosa (cioè di almeno il 10% meno cara) in tutti i paesi, tranne che per la Spagna e l'Olanda. Mentre quando il tasso è del 10%, il nucleare conserva una posizione privilegiata solo per quattro paesi (Belgio, Francia, Germania e Giappone), è praticamente paritario al carbone in due nazioni (Canada e Finlandia), mentre risulta meno vantaggioso nelle restanti tre. Infine, il tasso di *break-even* mostra il tasso di rendimento al quale si ha l'equilibrio tra il nucleare ed il carbone.

Da quanto riportato è dunque possibile affermare che esiste una reale convenienza del nucleare, tranne che per i paesi che dispongono di carbone a basso costo. Ora, in linea generale, la posizione favorevole del nucleare si manterrebbe anche in seguito ad un ribasso del prezzo del carbone o ad un rialzo dei tassi di rendimento, mentre aumenterebbe ancora di più nel caso di un andamento opposto delle ultime due grandezze economiche.

Tab. 33 – Paragone tra i costi di generazione per impianti a carbone e nucleari.

Nazione	Rapporto costo elettricità da carbone/costo elettricità da nucleare		
	Tasso del 5%	Tasso del 10%	Tasso di break-even %
Belgio	1,79	1,42	17
Canada	1,33	1,06	12
Finlandia	1,2	0,98	10,6
Francia	1,45	1,22	17,6
Germania	1,42	1,13	12,2
Giappone	1,28	1,11	13,6
Olanda	0,95	0,8	3,6
Regno Unito	1,06	0,85	6
Spagna	0,97	0,77	4,5
Stati Uniti	1,07	n. p.	6,4
Media	1,252	1,0378	10,35

Fonte: Anonimo, *Relazione introduttiva*, in Spezia, U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano, 1999, pp. 11-48.

Se poi si ripetesse lo stesso calcolo per paragonare, in ogni paese, il costo dell'elettricità nucleare rispetto a quella prodotta dal gas, di nuovo avremmo che il nucleare risulterebbe più competitivo ovunque, tranne che in Finlandia (dove il rapporto nucleare/gas sarebbe pari a 1,04), in Turchia (1,07) e negli Stati Uniti (1,33). Nel caso, invece, di un rapporto carbone/gas otterremmo che il metano si rivela più economico soltanto in quattro casi su dieci.

Dunque, si ha che "l'energia elettronucleare è competitiva, in termini di convenienza economica immediata, rispetto all'elettricità prodotta nelle centrali termoelettriche convenzionali".[171] Particolarmente competitiva risulta poi nel caso di costi del carbone superiori ai 25-35$ a tonnellata. In effetti, un recente studio dell'ENEL, citato alla Conferenza Nazionale su nucleare (1998), ha

[171] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

mostrato che, rispetto al nucleare, le nuove centrali che entreranno in servizio nel 2000 hanno costi di produzione più alti del:

- 15% per quelle a carbone
- 34% per quelle a ciclo combinato gas-vapore
- 37% per quelle a petrolio.

In linea generale, si può quindi affermare che i costi unitari dell'energia elettrica prodotta dal nucleare sono minori, seppur simili, a quelli dell'elettricità prodotta da altre fonti. Ora, se è vero che i costi di produzione dipendono dalle caratteristiche specifiche di ogni paese (esistenza o meno di fonti idrauliche, di fonti fossili locali, loro costo di estrazione e lavorazione, distanza tra i luoghi di estrazione delle fonti e luoghi di produzione di elettricità) è anche vero che essi sono in gran parte dovuti al mercato internazionale delle fonti fossili, in particolare petrolio e carbone, anche se attualmente il metano sta conquistando spazi sempre maggiori sulla scena energetica internazionale grazie alle sue scarse emissioni di gas inquinanti ed ai brevi tempi di costruzione degli impianti.

A questo punto, però, ciò che più ci importa è paragonare i costi di generazione delle fonti tradizionali con quelli dell'*Energy Amplifier*, onde dimostrare che esso è una forma di energia realmente competitiva con quelle tradizionali.
Ma per fare ciò dobbiamo poterci basare su scale di tempo compatibili e dunque dobbiamo "allungare" la vita delle centrali fin qui considerate ad un periodo di cinquanta anni ed in seguito calcolarne i costi di generazione dell'energia.

Per ottenere questo risultato si è calcolata la percentuale di diminuzione dei costi totali tra i 30 e i 40 anni per un impianto tradizionale, e ipotizzando che la diminuzione dei costi sia la stessa anche tra i 40 e i 50 anni, si è applicata quella stessa percentuale al costo di generazione di quell'impianto con una vita di 40 anni.[172] Si è così ottenuta la quota, in millesimi di dollaro, che va sottratta dal costo totale per l'impianto con una vita di 40 anni, onde ottenere finalmente il costo totale di generazione per una vita dell'impianto di 50 anni. Lo stesso calcolo è stato ripetuto per ogni impianto, in ogni paese e per entrambi i tassi di sconto ed è riportato nelle tabelle che seguono, calcolando infine la media.

---

[172] In realtà la diminuzione dei costi per gli impianti nucleari dovrebbe essere maggiore, poiché dopo i 40 anni essi hanno completamente ammortizzato gli investimenti iniziali e quindi operano in attivo.

Tab. 34 – Costo totale di generazione per un impianto a carbone con una vita di 50 anni al tasso di sconto del 5% e del 10% in USmill/kWh.

Vita impianto	30	40	50
Belgio	41,82	40,28	38,80
Canada 1	30,18	29,21	28,27
Canada 2	43,03	41,45	39,93
Danimarca	39,02	37,56	36,15
Finlandia	32,81	31,82	30,86
Francia	47,98	46,38	44,83
Italia	43,53	42,24	40,99
Olanda	46,10	44,85	43,63
Spagna	43,75	42,24	40,78
USA	26,35	25,01	23,74
Media	39,46	38,10	36,80

Nota: fattore di carico al 65%

Vita impianto	30	40	50
Belgio	53,37	52,47	51,59
Canada 1	37,61	37,03	36,46
Canada 2	43,03	41,45	39,93
Danimarca	49,75	48,90	48,06
Finlandia	39,67	39,11	38,56
Francia	60,49	59,54	58,60
Italia	53,49	52,73	51,98
Olanda	57,28	56,48	55,69
Spagna	55,57	54,67	53,78
USA	35,38	34,63	33,90
Media	48,56	47,70	46,86

Nota: fattore di carico al 65%

Nota: il Canada risulta con gli stessi costi sia per il tasso del 5% che del 10% già nei dati originali, per cui si è preferito non apportare modificazioni.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da IEA, *Projected costs of generating electricity,* op. cit.

Tab. 35 – Costo totale di generazione per un impianto a gas con una vita di 50 anni al tasso di sconto del 5% e del 10% in USmill/kWh.

Vita impianto	30	40	50
Belgio	36,82	35,99	35,18
Canada	29,87	30,03	30,19
Danimarca 1	45,80	44,90	44,02
Danimarca 2	52,14	51,21	50,30
Finlandia	36,62	35,92	35,23
Francia	48,35	47,42	46,51
Italia	47,10	46,55	46,01
Olanda	43,15	42,62	42,10
Spagna	48,67	47,91	47,16
USA	25,44	27,14	28,95
Media	41,40	40,97	40,56

Nota: fattore di carico al 65%

Vita impianto	30	40	50
Belgio	42,80	42,33	41,87
Canada	29,87	30,03	30,19
Danimarca 1	52,46	51,94	51,43
Danimarca 2	58,28	57,77	57,26
Finlandia	41,45	41,07	40,69
Francia	53,84	53,35	52,86
Italia	51,70	51,30	50,90
Olanda	48,70	48,30	47,90
Spagna	54,82	54,36	53,90
USA	23,17	23,60	24,04
Media	45,71	45,41	45,11

Nota: fattore di carico al 65%

Nota: il Canada risulta con gli stessi costi sia per il tasso del 5% che del 10% già nei dati originali, per cui si è preferito non apportare modificazioni.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

Tab. 36 – Costo totale di generazione per un impianto nucleare con una vita di 50 anni al tasso di sconto del 5% e del 10% in USmill/kWh.

Vita impianto	30	40	50
Canada 1	31,80	29,57	27,50
Canada 2	26,62	24,67	22,86
Finlandia	39,82	37,28	34,90
Francia	34,42	32,24	30,20
Spagna	43,65	41,04	38,59
USA	35,54	33,27	31,14
Media	35,31	33,01	30,87

Nota: fattore di carico al 65%

Vita impianto	30	40	50
Canada 1	48,56	47,24	45,96
Canada 2	26,62	24,67	22,86
Finlandia	57,38	55,93	54,52
Francia	50,46	49,15	47,87
Spagna	65,44	63,83	62,26
USA	47,44	46,13	44,86
Media	49,32	47,83	46,39

Nota: fattore di carico al 65%

Nota: il Canada risulta con gli stessi costi sia per il tasso del 5% che del 10% già nei dati originali, per cui si è preferito non apportare modificazioni.
Fonte: nostra elaborazione dei dati tratti da IEA, *Projected costs of generating electricity*, op. cit.

3.6.5 – Competitività dell'*Energy Amplifier*

A questo punto, avendo livellato le ipotesi, si può procedere ad un paragone tra l'*Energy Amplifier* e le altre fonti energetiche, andando a guardare i costi totali attesi di generazione dell'elettricità, presi nel loro valore medio e nei loro limiti superiori ed inferiori, per un tasso di sconto del 5%.

Tab. 37 – Confronto tra i costi di generazione totali**.**

Fonte*	Tasso di sconto 5%			Tasso di sconto 10%		
	Costi totali	Lim. inf. (Paese)	Lim. sup. (paese)	Costi totali	Lim. inf. (Paese)	Lim. sup. (paese)
Carbone	36,80	23,74 USA	44,83 Francia	46,86	33,90 USA	58,60 Francia
Gas	40,56	28,95 USA	50,30 Danimarca 2	45,11	24,04 USA	57,26 Danimarca 2
Nucleare	30,87	22,86 Canada 2	41,91 Canada 1	46,39	22,86 Canada 2	62,26 Francia
EA	20,08	16,70	23,30	31,12	25,54	36,46

Nota: * dal confronto vengono escluse le fonti rinnovabili a causa della irreperibilità di dati da fonti ufficiali e dunque per l'impossibilità di condurre un paragone fondato su stime attendibili.
Fonte: elaborazione dei dati tratti da NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. e da Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

Dalla analisi della prima colonna della tab. 37 risulta già chiaro come l'*Energy Amplifier* si riveli la fonte più economica tanto per i costi di generazione medi, quanto per quelli ai limiti. Ma, per dimostrare la competitività dell'EA possiamo procedere ad un paragone fonte per fonte.
Nel fare un paragone tra i costi di carbone metano ed energia nucleare, si vede che l'elettricità dal nucleare è circa il 20% meno cara rispetto al primo e circa il 35% rispetto al secondo.
Pur essendoci diversità da paese a paese, in generale il costo medio atteso dell'elettricità dai normali impianti nucleari è di 30,87 USmill/kWh, che è maggiore di 1,54 volte il costo atteso dell'EA,

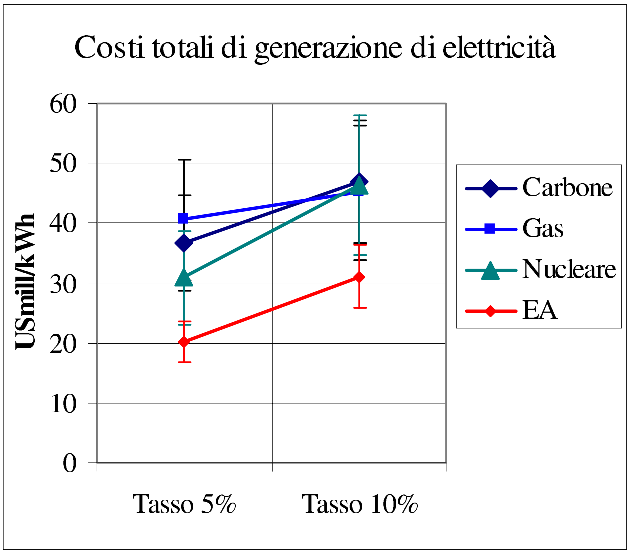
mentre il più basso costo atteso di un impianto nucleare *standard* è di 1,14 volte più caro di quello dell'EA.

Secondo queste stime, si ha dunque che il costo dell'elettricità proveniente dall'EA è di 1,83 volte minore rispetto a quello dal carbone e 2,06 rispetto a quello del metano, ad un tasso di sconto netto del 5%. Mentre in caso di un tasso del 10%, il costo dell'EA è di 1,51 volte minore rispetto al carbone, di 1,45 volte rispetto al metano e di 1,49 volte rispetto al nucleare tradizionale.

Ora, gli scarti tra i costi di generazione per gli impianti a carbone e a metano (fig. 21) sono dovuti alle differenze nei prezzi e nella disponibilità dei combustibili, mentre le incertezze nell'EA sono dovute alla natura preliminare del progetto.

Nonostante queste incertezze, la tab. 37 mostra come il costo dell'energia prodotta dall'EA risulti inferiore a quello delle altre fonti, come conseguenza diretta della semplicità di base del progetto e dell'alto livello di sicurezza intrinseca dell'EA. Da notare è anche il fatto che, ad un tasso del 5%, l'*Energy Amplifier* resterebbe una forma di energia economica anche se il suo costo fosse al suo valore più alto (23, 30 USmill/kWh), a parità di costo medio delle altre fonti. L'unica sovrapposizione dei costi la si avrebbe con i reattori canadesi, per i quali è stato qui previsto un costo di 22,86 USmill/kWh, "allungando" la sua vita fino a 50 anni.

Fig. 21 – Costi di generazione d'elettricità e loro scarti per le diverse fonti.



Fonte: nostra elaborazione.

La posizione favorevole dell'EA si manterrebbe anche in riferimento al costo del calore generato (tale calore può essere usato per numerosi fini industriali e domestici) e risultando di circa tre e cinque volte minore, rispettivamente, di quello del carbone e del metano.[173]

[173] Cfr.: Fernàndez R., et al., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, op. cit.

Per completezza d'analisi, bisogna dire che è stato più volte affermato, anche da persone coinvolte nel progetto, che la presenza dell'acceleratore, allo stato attuale delle cose, potrebbe incidere sul costo dell'EA per un addizionale 20%, cosa che diminuirebbe alquanto la sua competitività. Ma, la possibilità di portare avanti il progetto e di costruire un prototipo in scala reale darebbe l'occasione per studiare, nella pratica, il comportamento di ogni singolo componente dell'impianto e per verificare quali siano le opzioni più economiche ed al contempo più sicure. Di conseguenza, sebbene al "normale" reattore debba essere aggiunto, con costi addizionali, un acceleratore, questi costi vengono compensati dal minor costo del ciclo del combustibile (poiché non vi è alcuna separazione di isotopi) e dalla maggiore facilità di esercizio, con una manipolazione meno frequente delle barre di combustibile, oltre che, come già riferito, dalla presenza di una serie di dispositivi di sicurezza passiva.[174] Tutto questo permetterebbe all'*Energy Amplifier* di rientrare in competizione con le altre fonti energetiche.

Inoltre, visto che l'EA è un investimento ad alta intensità di capitale, il costo dell'energia dipenderà direttamente dal costo del denaro ed in effetti, è stato notato che la sua competitività aumenta al crescere del prezzo del petrolio ed al diminuire del tasso di sconto. Dunque, in un momento come quello attuale, dove l'oro nero costa più di 28$ al barile ed il costo del denaro è ben al di sotto del 5%, l'*Energy Amplifier*, se già esistesse, si dimostrerebbe, in assoluto, la fonte energetica più competitiva.

Concludendo, dunque, uno studio dell'IEA (*Competition and new technologies in the electric power sector*, 1996) ha chiaramente dimostrato come non esista nessuna fonte energetica tradizionale che risulti economicamente vincente in tutti i paesi, poiché sono le caratteristiche specifiche di ogni nazione a determinare la scelta più vantaggiosa. Anche se è d'obbligo far notare come gli impianti a gas si presentino come l'opzione più valida nel breve periodo per diversi motivi: relativamente semplici e veloci da costruire, hanno bassi costi di costruzione e manutenzione, costi del combustibili minori di quelli previsti in precedenza e bassi costi di protezione ambientale se paragonati a quelli delle altre fonti fossili. Inoltre, era opinione diffusa, fino a pochi mesi fa, che i costi dell'elettricità di base nel suo insieme sarebbero rimasti piuttosto stabili nei prossimi anni, senza che per altro vi fosse una fonte energetica privilegiata, in quanto le scelte tecnologiche e di combustibile sarebbero variate in ragione della disponibilità di combustibile e dei prezzi relativi.

Adesso, però, visti gli squilibri che gli alti prezzi del greggio stanno apportando in ogni settore economico ed in particolar modo in quello energetico, le previsioni sul mercato elettrico stanno subendo delle variazioni. Certo da molte parti si afferma che il petrolio non potrà mantenersi stabile a questi prezzi, poiché si genererebbe un processo di ricerca di fonti ad esso alternative. In ogni caso,

---

[174] Cfr.: Anonimo, The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand, CERN Courier, vol.35, n.3, May 1995, pp.15-19.

questo periodo è un'ulteriore conferma che l'economia del mondo occidentale dipende, di fatto, dalle decisioni di un esiguo numeri di paesi che controllano la capacità e possibilità di generare energia. E proprio di fronte a tale considerazione l'*Energy Amplifier* si mostra ancora di più una soluzione valida e competitiva: valida perché sfrutta un combustibile le cui riserve sono abbondanti e diffuse; e competitiva perché, secondo le stime qui elaborate, si dimostra in assoluto il metodo per la generazione di elettricità più economico.

Deborah Sessano

CAPITOLO 4
PROBLEMI SOCIALI ED AMBIENTALI NEL MERCATO ENERGETICO

4.1 – Gas-serra e fonti fossili

Nel nostro secolo, l'umanità si è trovata, per la prima volta, nella situazione di dover riconoscere che le proprie attività non solo possono influire sulle condizioni di salute della Terra, ma che effettivamente le stanno mutando.

L'effetto serra è la conseguenza di un processo naturale: l'irradiazione solare. Infatti, la Terra viene investita dai raggi solari, un terzo di essi viene riflesso, mentre il resto viene assorbito dall'atmosfera, dalla terra emersa e dagli oceani. Ora, la radiazione solare assorbita deve essere controbilanciata da quella terrestre, ascendente, assorbita e poi liberata, da vari "gas a effetto serra", quali il vapor acqueo, il metano e l'anidride carbonica. Proprio questo "effetto serra" naturale è ciò che permette al nostro pianeta di avere un clima mite e costante.

Ma ciò che normalmente si intende con il termine di gas-serra è un insieme di sostanze immesse nell'atmosfera, per lo più da attività umane, capaci di instaurare un processo di riscaldamento globale del pianeta. I principali gas-serra sono: l'anidride carbonica (CO_2), il metano (CH_4), il protossido di azoto (N_2O), esafluoruro di zolfo (SF_6), gli idrofluorocarburi (HFC), i perfluorocarburi (PFC) e i clorofluorocarburi (CFC).[175]

Particolare attenzione viene data all'anidride carbonica, infatti ciò che temono gli scienziati è che, se la quantità di CO_2 presente nell'atmosfera aumenta troppo e troppo in fretta, si possa avere un riscaldamento eccessivo del clima (circa 2° C al secolo, di qui il nome di "effetto serra"), con conseguenze catastrofiche quali lo scioglimento dei ghiacci polari, l'innalzamento dei livelli degli oceani, l'inondazione di terre costiere e notevoli perturbazioni climatiche.

Ognuno di noi è ben conscio del problema dell'effetto serra e, malgrado gli scienziati non sempre concordino sulla gravità della situazione attuale, è comunque fuori dubbio che, se il *trend* attuale d'immissione di gas nocivi continuerà invariato, molto presto l'uomo inizierà a vedere gli effetti delle proprie incaute azioni. Proprio grazie a tale presa di coscienza, anche da parte dei governi si è così giunti agli accordi di Kyoto.[176]

---

[175] Cfr.: Silvestrini G., *Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra*, in "Le scienze", n.363, novembre 1998, pp. 78-84.

[176] In effetti, tutti gli scienziati riconoscono la pericolosità dell'aumento della temperatura del pianeta e dell'immissione indiscriminata di anidride carbonica nell'atmosfera terrestre, ma la relazione causa-effetto è ancora oggetto di dibattito, vista la fenomenologia piuttosto complessa dell'oggetto di studio. Per una breve elencazione dei motivi di disaccordo tra gli scienziati, si cfr. Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

4.1.1 – Breve storia delle conferenze sul clima

Dopo il *Summit* di Rio nel giugno 1992, il 21 marzo 1994 è entrata in vigore la Convenzione Quadro sui cambiamenti climatici (*Framework Convention on Climate Change)*, con valore di provvedimento di diritto internazionale per i paesi che l'hanno ratificata e ispirata ai principi di: tutela del clima, responsabilità primaria dei paesi industrializzati, piena considerazione delle richieste e delle situazioni particolari dei PVS. L'obiettivo è «la stabilizzazione delle concentrazioni di gas-serra nell'atmosfera a livelli che prevengano pericolose interferenze antropogeniche con il sistema climatico».[177]

Vi sono parecchi impegni vincolanti, che si applicano a tutti i paesi: la preparazione e la comunicazione alla Conferenza delle Parti di rapporti nazionali riguardanti le emissioni di gas-serra, lo sviluppo e la comunicazione (alla suddetta conferenza) di programmi per mitigare gli effetti dei gas-serra e di misure per adeguarsi ai cambiamenti climatici, la cooperazione per lo sviluppo tecnologico.

Per i paesi dell'OCSE, poi - esclusi però UE, Messico e undici paesi in via di transizione – si è previsto che essi possano implementare le politiche ambientali insieme ad altri paesi, assistendoli nella realizzazione degli obiettivi della Convenzione. Si tratta del concetto cosiddetto di implementazione congiunta (*joint implementation*), che viene interpretato nel senso che un paese ottiene dei crediti per i propri obiettivi, quando contribuisce a ridurre le emissioni in un altro paese.

Già durante la prima Conferenza delle Parti a Berlino nel 1995 emersero le prime divisioni. In seguito alla richiesta da parte degli Stati insulari (minacciati dal aumento del livello dei mari) di un forte impegno dei paesi industrializzati nella riduzione delle emissioni, si distinsero chiaramente tre *lobby*: da una parte quella dell'industria energetica – soprattutto statunitense – e quella dei paesi dell'OPEC, chiaramente contrarie agli obiettivi della Convenzione e decise a tutelare i propri interessi nel lungo periodo, e dall'altra parte, la *lobby* dell'emergente industria delle energie rinnovabili e delle fonti alternative.

Durante la seconda Conferenza delle Parti, a Ginevra nel 1996, è poi emerso un quarto gruppo, formato da 57 imprese appartenenti al settore assicurativo, che schierandosi contro l'industria energetica e l'OPEC, ha sostenuto l'importanza di limitare le emissioni di gas-serra per evitare il verificarsi dei catastrofici eventi climatici accaduti negli ultimi anni (uragani, alluvioni, inondazioni).

Arriviamo così a dicembre 1997, dove, durante la terza Conferenza delle Parti, a Kyoto, è stato firmato un Accordo. In esso, numerosi paesi si sono assunti un esplicito impegno a diminuire, in maniera significativa e quantitativamente determinata, le proprie emissioni di gas serra rispetto a quelle calcolate nel 1990, anno in cui era stato valutato che le emissioni di anidride carbonica (CO_2)

---

[177] Citato in Amedei P., *Le conferenze sui cambiamenti climatici: da Rio de Janeiro a Tokyo*, in "Economia delle fonti di energia e dell'ambiente", vol. XL, n.3, settembre 1997, pp. 4-7.

dovute alle attività umane consistevano in circa 15 Gton (miliardi di tonnellate) all'anno[178], la riduzione globale dovrà essere pari a circa il 5% di esse entro il 2010. Secondo molti si tratta del primo passo verso lo sviluppo di una politica energetica mondiale e sostenibile.

In particolare, a Kyoto, è risultato chiaro che le politiche energetiche rispettose dell'ambiente non si possono limitare al solo sistema di offerta delle fonti fossili, rinnovabili, ecc. (approvvigionamenti, valorizzazione delle risorse locali, competitività delle imprese produttrici di energia), ma devono anche e soprattutto dedicarsi al sistema della domanda e dell'uso dell'energia da parte dei diversi settori, siano essi pubblici o privati, dell'industria, del trasporto, dell'agricoltura, ecc.[179] Uno degli strumenti principali, previsti per aumentare l'efficienza energetica e l'incidenza delle fonti rinnovabili, è il commercio dei diritti di compravendita delle emissioni, rivolto in particolare alle economie in transizione e ai PVS, in modo da realizzare gli obiettivi globali di riduzione delle emissioni di CO_2 a costi inferiori per tutti i paesi.

Tab. 38 - Riduzione percentuale dei gas-serra in rispetto agli Accordi di Kyoto.

Austria	- 13
Belgio	- 7,5
Danimarca	- 21
Finlandia	0
Francia	0
Germania	- 21
Grecia	37
Irlanda	13
Italia	- 6,5
Lussemburgo	- 28
Paesi Bassi	- 6
Portogallo	27
Regno Unito	- 12,5
Spagna	15
Svezia	4

Fonte: Silvestrini G., *Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra*, in "Le scienze", n.363, novembre 1998, pp. 78-84.

In ogni caso, gli accordi presi a Kyoto non sono sinonimo di un completo abbandono dei combustibili fossili, in quanto l'anidride carbonica da essi derivante può venire stoccata in modo sicuro attraverso vari procedimenti:

- sotto forma liquida in acque profonde (più di 3 Km)

---

[178] Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

[179] Per un'esposizione dettagliata degli obiettivi, delle azioni e dei quadri di riferimento necessari a mettere in atto queste politiche energetiche, cfr.: Anonimo, *Energia e ambiente post-Kyoto: bilanci e scenari*. Sito Internet: http://www.enea.it/chiave_energia.htm E cfr.: Landau Network – Centro Volta, *Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici*, Volume 1, settembre 1998, in "I Rapporti". Sito Internet: http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

– in giacimenti esauriti di petrolio e metano, che possono assorbirla se ripompata sottoterra
– più in generale, immagazzinata sottoterra in vari tipi di terreni e con diversi procedimenti.

Tutti questi metodi sonno attuabili, ma chiaramente aumenteranno i costi dell'energia ad essi associata e porteranno allo sviluppo di metodi di produzione d'energia combinati con separazione e immagazzinamento dell'anidride carbonica.[180]

4.1.2 – L'anidride carbonica

Per capire il perché sia l'anidride carbonica il gas-serra che preoccupa di più, basti pensare che nella sola Italia, nel 1997, sono state prodotte 410 tonnellate di emissioni di CO_2 dovute a conversione energetica, dove circa il 35% è dovuto alla generazione di energia elettrica, il 25% ai trasporti, il 18% al settore civile e il 23% all'industria.[181] È stato stimato che la diffusione di centrali ad alta efficienza e di impianti di generazione accoppiati al teleriscaldamento permetteranno di ridurre le emissioni di CO_2, rispettivamente di 20 milioni e di 2 milioni di tonnellate all'anno, entro il 2010.

Ma ciò che preoccupa maggiormente sono le emissioni che potrebbero venire dai PVS e dai paesi dell'Asia Orientale, in fase di forte crescita. Infatti, è stato calcolato che, se la crescita industriale cinese proseguisse con lo stesso ritmo attuale fino al 2050 continuando a sfruttare soprattutto carbone, la Cina rilascerà nell'atmosfera circa otto volte l'anidride carbonica attualmente prodotta dall'insieme dei paesi industrializzati.

Concludendo, dunque, i maggiori danni dei combustibili fossili sono associati al riscaldamento globale del pianeta e alla mortalità dovuta all'inquinamento atmosferico. In linea generale si può affermare che, essendo il gas naturale più pulito, esso provoca danni minori rispetto al carbone, e questi danni risultano tra le due e le quattro volte inferiori per le centrali europee.

Purtroppo, per i combustibili fossili, le analisi non sono molto dettagliate, a causa delle incertezze tecniche ed economiche sia sull'incidenza dei loro gas sull'atmosfera, sia sui costi sociali della CO_2 emessa, che possono variare fortemente nella percentuale dei costi di produzione. Comunque è stato calcolato che per gli impianti a carbone presenti nell'EU, qualora i danni ambientali vengano monetarizzati, essi corrispondono ad una percentuale che varia dal 10 al 100% del prezzo di mercato dell'elettricità da essi prodotta.[182] Mentre, a livello mondiale, secondo i risultati di uno studio[183] che

---

[180] Ad esempio, nel caso 3., il costo dei trattamenti per la sistemazione sotterranea della CO_2, , associata alla produzione di energia dal metano, porterebbe quest'ultima a costare 6$ per GJ, invece degli abituali 3$ per GJ. Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/dossier/index.html

[181] Le percentuali sono indicative. Si noti inoltre che i costi esterni ambientali per il solo settore termoelettrico vengono stimati in 25.000 miliardi all'anno. Cfr.: Silvestrini G., *Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra,* in "Le Scienze", n.363, novembre 1999, pp.78-84.

[182] Cfr.: Wilson R., Holland M., Rabl A., Dreicer M., *The meaning of results. Comparative risk assessments of energy options*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 14-18.

ha elaborato in termini monetari i danni ambientali planetari per fonte energetica, essi risultano essere (in centesimi di dollaro per kWh):

- per il petrolio: 16,48 US¢/kWh;
- per il carbone: 16,34 US¢/kWh;
- per il gas naturale: 3,02 US¢/kWh;
- per il nucleare: 1,63 US¢/kWh.

4.2 – Problemi dell'energia nucleare convenzionale

Quando si parla di energia nucleare attuale, sono numerosi i problemi, veri o presunti, che si affacciano alla mente di ognuno di noi: gli incidenti nei reattori, le scorie radioattive, il loro stoccaggio ed i danni alla salute, la proliferazione degli armamenti nucleari con il collegato traffico illecito di plutonio, ecc., insomma, in una parola, la sicurezza nell'industria nucleare.

4.2.1 – Incidenti di criticità

Una delle paure maggiori che l'animo umano associa spontaneamente all'energia nucleare è quella di un incidente all'interno dei reattori che causi il rilascio di una nube radioattiva. Questo timore è certamente una delle tante eredità lasciateci dall'incidente che avvenne a Chernobyl parecchi anni fa, ed il negare la possibilità – per quanto remota – di eventi simili all'interno delle centrali tradizionali non sarebbe onesto. Ma prima di affermare che, in Occidente una simile probabilità è assai remota, bisogna analizzare come si verificano dei simili incidenti.

Affinché avvenga una reazione a catena, la quantità di combustibile deve superare una certa soglia, detta massa critica, che è di circa dieci chili nel caso del plutonio e di 60 chili nel caso dell'uranio 235.[184]

Al procedere della reazione a catena in cui viene bruciato l'uranio, aumenta la concentrazione dei prodotti di fissione, i quali, non essendo fissili, catturano i neutroni. Per questo motivo, è necessario che all'inizio il combustibile sia presente in quantità superiori a quella critica. Inizialmente, per mantenere il controllo della reazione, in mezzo al combustibile ci sono le barre di controllo, le quali permettono di limitare il numero delle fissioni e quindi di evitare un'esplosione. In seguito, al crescere dei frammenti di fissione, le barre di controllo vengono estratte successivamente, così da permettere la continuazione della reazione a catena.

---

[183] Citato in Ricci R.A., *Il ruolo del nucleare nelle strategie ambientali*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 95-108.

[184] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

Ora, se per un qualsiasi motivo, la cattura neutronica da parte dei frammenti di fissione dovesse diminuire, la produzione del calore aumenterebbe velocemente, con il rischio di un'esplosione (come è successo a Chernobyl, dove si usava la grafite come moderatore) o di una fusione del nocciolo (come è accaduto a Three Mile Island, dove il moderatore era l'acqua).
Per quanto riguarda Chernobyl si può in tutta serenità affermare che un simile incidente non si sarebbe mai verificato in una centrale occidentale, dove la concezione ingegneristica è totalmente diversa e dove gli *standard* di sicurezza e gli edifici di contenimento esistono, sono ridondanti e funzionano. Il caso di Three Mile Island invece, per quanto paradossale possa sembrare, è stata la prova più evidente che i reattori "nostrani" sono in grado di affrontare e controllare situazioni estreme, garantendo un alto livello di sicurezza. Si ricordi infatti che, durante questo incidente, non ci furono fughe radioattive all'esterno dell'area della centrale, nonostante si fosse solo nel 1979, quando gli *standard* internazionali di sicurezza erano ben inferiori a quelli attuali.

4.2.2 – Combustibile spento, scorie e depositi

Un altro dei principali problemi derivante dal nucleare è quello che riguarda i residui del ciclo energetico, cioè il combustibile spento (= già usato) e le scorie, i quali essendo radioattivi provocano anch'essi timori e fobie. Ma prima di addentrarci nella discussione, sarebbe opportuno ricordare che le scorie provenienti da una tonnellata d plutonio sono pari a 1,2 Kg e di queste, come dice Charpak, solo l'1% - il peso di un pacchetto di sigarette – costituisce il materiale più pericoloso, essendo composto da elementi o fortemente radioattivi a vita brevissima o meno radioattivi ma dalla vita molto lunga.[185] È anche interessante sapere che, contrariamente a quanto si crede generalmente, la quantità di rifiuti dal nucleare è significativamente più piccola di quella derivante da altri combustibili.

Tab. 39 – Emissioni di una centrale elettrica da 1000 MWe.

Centrale	Emissioni gassose (t/anno)		Scorie solide (t/anno)
A carbone	CO_2	6.500.000	250.000 (1 camion/ora)
	SO_2	9.000	
	NO_X	4.500	
Nucleare			100 (4 camion/anno)

Fonte: Ricci R.A., Il ruolo del nucleare nelle strategie ambientali, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, op. cit.

Ora, il combustibile nucleare usato, una volta estratto dal nocciolo, presenta due tipi di problemi. Prima di tutto, emana ancora per parecchi anni un notevole calore, a causa della disintegrazione dei prodotti di fissione, e quindi deve essere lasciato raffreddare in apposite piscine per vario tempo

---

[185] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., Il fuoco del 2000.L'energia nucleare nel terzo millennio, op. cit.

prima di poter essere nuovamente manipolato, per essere rielaborato o definitivamente stoccato. In secondo luogo, e questo è l'aspetto più problematico, i residui presentano una tossicità, diversa nella durata a seconda delle scorie.

È stato stimato che la quantità di rifiuti radioattivi, provenienti dall'energia nucleare (e dunque senza tener conto del settore militare), da smaltire nel 2010 sarà pari a 300.000 tonnellate, mentre oggi sono circa 240.000.[186]

Tab. 40 – Residui del ciclo nucleare e loro periodo di dimezzamento.

Frammenti di fissione		Transuranici	
Stronzio 89	50,5 giorni	Nettunio 237	2,2 mil. anni
Cripton 85	10,7 anni	Nettunio 238	87,74 anni
Stronzio 90	28,8 anni	Plutonio 238	88 anni
Zirconio 95	64 giorni	Plutonio 239	24.100 anni
Tecnezio 99	211.000 anni	Plutonio 240	6.570 anni
Iodio 129	15,7 mil. anni	Plutonio 241	14 anni
Iodio 131	8,04 giorni	Plutonio 242	387.000 anni
Cesio 134	2,062 anni	Americio 241	433 anni
Cesio 135	2,3 mil. anni	Americio 242	141 anni
Xenon 135	9,10 ore	Americio 243	7.370 anni
Cesio 137	30,17 anni	Curio 242	162,8 giorni
Cerio 144	285 giorni	Curio 244	18,11 anni

Fonte: Buono S. in *La pattumiera atomica,* in ."Newton", n. 10, ottobre 1999.

Dunque, i maggiori rischi correlati alla produzione di energia nucleare sono gli eventuali cancri e i possibili effetti ereditari che potrebbero risultare dall'esposizione ad alte dosi di radioattività nell'ambiente, soprattutto nel lungo periodo, determinando così un forte rischio per la collettività. Ma, nel fare questo calcolo, non bisogna dimenticare l'importanza dell'aderenza di ogni governo agli *standard* di sicurezza internazionali, qualora vi sia tale aderenza, infatti, gli impatti del nucleare si rivelano minimi.

Ma, per affrontare un discorso serio e privo di pregiudizi, è bene sapere che l'uomo è da sempre soggetto alle radiazioni, le quali provengono direttamente dalla Terra (900 Bq al chilo), dai raggi cosmici, dalle attività umane mediche (radiografia, scintigrafia, Pet) e dal nostro stesso corpo (che ha un'attività di ben 8.000 Bq al secondo).[187]

L'effetto negativo che la radiazione ha sull'uomo è definito "dose efficace" ed è misurato in Sievert (Sv).[188] Ora la dose assorbita in media da un uomo in un anno, dovuta a cause naturali, è di 2,4 mSv.

---

[186] Cfr.: Buono S., *La pattumiera atomica*, in "Newton", n. 10, ottobre 1999, pp. 142-157.

[187] Il Becquerel (Bq) è un'unità che indica direttamente il numero di disintegrazioni al secondo che avvengono nel materiale radioattivo. Per i dati qui riportati, come per i seguenti si cfr. Buono S., *La pattumiera atomica*, in "Newton", n. 10, ottobre 1999, pp. 142-157.

[188] Il Sievert esprime la radiotossicità di un elemento ed il suo effetto biologico negativo sull'organismo umano.

La corte europea ha stabilito che la dose massima aggiuntiva ammessa per l'insieme delle attività umane, incluso il nucleare, è di 1 mSv. Infine, la dose ritenuta letale per un essere umano è di 4,5 Sv.
Come è già stato accennato, le scorie possono subire due tipi di trattamento.
Il primo è detto riprocessamento e consiste nel recuperare dai residui radioattivi l'uranio ed il plutonio ancora disponibili, che vengono pertanto riutilizzati, mentre gli altri elementi restanti vengono mandati nei depositi. Questo metodo è seguito in molti paesi "nucleari" (tra cui la Francia), i quali insistono sulle economie legate a questo metodo. D'altra parte il problema insito in questa opzione è l'eventuale utilizzo del plutonio per le armi nucleari.
La seconda tecnica è invece detta ciclo diretto, in quanto tutto il combustibile viene direttamente mandato nei depositi; eventualmente, prima dello smaltimento, esso può subire il condizionamento per diminuirne la pericolosità ed evitarne il riutilizzo. È questo il metodo seguito, tra gli altri paesi, anche dagli Stati Uniti.
I depositi a cui vengono inviate le scorie, indipendentemente dal trattamento subito, sono di due tipi: il deposito secolare, cui vengono inviati i residui a vita breve (poche decine d'anni o qualche secolo) in contenitori appositi controllati dall'uomo; e il deposito geologico, cui vengono inviate le scorie a vita media e lunga (fino a svariati milioni di anni) e sul quale è umanamente impossibile garantire un controllo visti i tempi richiesti per l'annullamento dei rischi. In questo caso la sicurezza dei depositi è garantita dalla morfologia del terreno e dalla composizione e costruzione dei contenitori. In ogni caso, per ora non esistono ancora siti geologici già sigillati e se, come probabile, il primo deposito di questo tipo sarà quello americano progettato nella Yucca Mountain si dovrebbe aspettare fino al 2100 per una sua chiusura definitiva.[189]
Ecco dunque che quello che viene visto come uno dei principali problemi del nucleare, cioè lo smaltimento delle scorie radioattive, si rivela avere delle soluzioni possibili e sufficientemente sicure. In realtà, la vera difficoltà è a livello politico, poiché i governi di tutto il mondo sono poco propensi ad affrontare con chiarezza e serenità la questione. Nel contempo, però, la ricerca scientifica si sta preoccupando di trovare una soluzione, e proprio in questo ambito l'EA, come vedremo tra poco, sta ricevendo particolare attenzione.

4.2.3 – Le scorie nucleari italiane

Può essere a questo punto interessante far notare come anche l'Italia abbia un problema di scorie nucleari. Infatti nonostante nel nostro paese oggi non si parli più di centrali e di reattori né di energia dai nuclei, sarebbe bene che nessuno (in particolare modo la classe politica) si scordasse che il

[189] Cfr.: Buono S., *La pattumiera atomica*, in "Newton", n. 10, ottobre 1999, pp. 142-137.

nucleare che abbiamo avuto ha comunque prodotto dei residui radioattivi e che molti di essi non solo non sono stati trattati, ma non hanno ancora una destinazione ed anzi si trovano ancora all'interno delle centrali. Infatti, nella loro più o meno breve vita, i nostri quattro reattori – Caorso, Latina, Trino Vercellese, Garigliano – hanno prodotto ben 327 tonnellate di rifiuti nucleari.[190]

Ma non basta, forse ci arriveranno anche scorie aggiuntive, che ci spettano in quanto l'Italia, o meglio l'ENEL, è in parte proprietaria del reattore francese Superphénix.

Per fortuna, almeno un ente, l'ENEA, sembra ricordarsi del problema e nel suo piano annuale del 1998, ha espressamente dichiarato quanto sia necessario trovare una soluzione alla questione e quanto sia importante per l'Italia continuare la ricerca per un metodo di smaltimento dei rifiuti nucleari, insistendo sull'opportunità di portare avanti il progetto dell'*Energy Amplifier*.[191]

Infine, una piccola curiosità che può aiutare a riflettere su quanto la scelta italiana di astensione dal nucleare sia stata caratterizzata dalla mancanza di informazione rivolta all'opinione pubblica. Abbiamo tutti visto, come la nube di Chernobyl, nonostante la grande distanza, abbia contaminato – seppur in misura lieve – vari paesi europei, tra cui l'Italia; ma poi abbiamo deciso "No, al nucleare" : pensiamo seriamente che se da uno dei 56 reattori francesi, o dei 5 reattori svizzeri o dei 20 tedeschi, fuoriuscisse una nube, questa eviterebbe l'Italia perché si è dichiarata antinucleare?

4.2.4 – Il problema delle armi nucleari

È onestamente impossibile affrontare un discorso sul nucleare, senza dare almeno un accenno ad uno dei punti più a sfavore di questa fonte energetica: i suoi collegamenti con l'industria della guerra.

Il problema nasce dal fatto che la fisica nucleare dei reattori e quella delle armi sono cresciute in parallelo, in forte interconnessione e spesso anche in totale segreto, a causa dell'enorme posta in gioco. In effetti, la "necessità" di plutonio – elemento che non esiste in natura e che viene prodotto artificialmente dall'uranio 238 – ha fatto sì che l'industria nucleare ricevesse numerosi sostegni da parte militare ed infatti, oggi, l'energia nucleare civile incontra uno dei suoi maggiori limiti nel fatto di essere nata dalla riconversione del settore bellico. Essa deve le proprie conoscenze alla costruzione delle armi nucleari e alla produzione dei materiali necessari a queste armi.

.

Ma ora, ci si ritrova in una condizione quasi opposta. Adesso, con la distensione dei rapporti internazionali e con gli accordi di non-proliferazione e di disarmo nucleare, si ha il problema di eliminare il plutonio in eccesso e di evitare che esso possa essere, in qualche modo, sottratto alle autorità e riutilizzato da gruppi terroristici o da paesi politicamente instabili.

---

[190] Cfr.: Buono S., *La pattumiera atomica*, op. cit.

[191] Per una descrizione dettagliata dell'impegno sullo smaltimento delle scorie, cfr.: Anonimo, *Obiettivo tematico 5: rifiuti radioattivi e sicurezza nucleare*, in sezione Piano Annuale. Sito Internet: http://www.enea.it/

Come abbiamo già visto, una possibilità di smaltimento del plutonio militare è data dai reattori veloci, i quali però sono poco "apprezzati" a causa degli alti costi di manutenzione e funzionamento dovuti alle caratteristiche di sicurezza richieste dall'uso del plutonio 239, che è ancora più pericoloso dell'uranio. Inoltre, anche questi reattori non precludono la "non-utilizzabilità" del loro combustibile a fine militare, infatti è in aumento il traffico internazionale di uranio e plutonio dai paesi occidentali a quelli dell'Asia mediorientale e del Sud, dove i governi continuano a fare test di armi nucleari, come è capitato nel 1998 in India e Pakistan. [192]

Proprio per prevenire la possibilità di fini militari all'utilizzo civile del militare sono stati concordati controlli ed ispezioni da parte della IAEA (l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica).

4.2.5 – La sicurezza negli impianti nucleari

Tutti gli aspetti problematici fin qui analizzati possono essere riassunti all'interno di un unico argomento, e cioè quello della sicurezza e dei controlli nelle centrali nucleari.

Negli ultimi decenni sono stati portati avanti numerosi sforzi a questo riguardo, oltre che a livello statale, anche da parte di varie organizzazioni internazionali e, in particolare, dall'IAEA. In effetti, questa agenzia si è preoccupata, nel corso degli anni, di elaborare degli *standard* di sicurezza per gli impianti nucleari. Un esempio per tutti è quello della *Convention on nuclear safety*, adottata il 17 giugno del 1994 ed entrata in forza il 24 ottobre 1996, alla quale hanno aderito ben 65 paesi, e cinquanta di essi l'hanno ratificata, impegnandosi così a rispettare gli obblighi da essa imposti: adeguatezza del sito, del progetto, della costruzione, disponibilità di risorse finanziarie ed umane, dichiarazioni e verifiche della sicurezza, assicurazioni di qualità e di preparazione e prontezza in caso di emergenze.[193]

A livello statale, invece, le regolamentazioni in fatto di sicurezza degli impianti nucleari variano profondamente da paese a paese, ma ovunque si concentrano sul rischio di morti accidentali immediate. Negli Stati Uniti, per esempio, questo rischio deve essere limitato – per la popolazione che vive vicino all'impianto nel diametro di un miglio – allo 0,1% dei rischi totali di morte accidentale per un qualsiasi altro incidente; mentre il rischio di cancro - per la popolazione che vive entro le 10 miglia – deve essere inferiore allo 0,1% dei rischi di cancro per qualsiasi altro motivo. Nel Regno Unito, invece, il criterio di rischio si basa sulla dose mortale di radiazioni che un individuo, che continua a vivere nelle vicinanze dell'impianto, può assumere; viene considerato

---

[192] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio, op. cit.

[193] Per informazioni precise riguardo ai termini della convenzione ed ai paesi firmatari, cfr.: IAEA, *Convention on Nuclear Safety*. Sito Internet: http://www.iaea.or.at/worldatom/glance/legal/nukesafety.html e IAEA, *Information Circular. Convention on Nuclear Safety,* July 1994. Sito Internet: http://www.iaea.or.at/worldatom/glance/legal/inf449.html

appena tollerabile il rischio di una dose su 100.000 all'anno e largamente accettabile una su un milione all'anno.

È qui opportuno aprire una breve parentesi per dire che, per fonti energetiche diverse dal nucleare, sono invece pochi gli stati che hanno creato delle regolamentazioni precise in fatto di sicurezza; in genere, infatti, seguono un approccio deterministico, nel senso che se le disposizioni statali vengono seguite, gli impianti sono ritenuti sicuri. Diverso è il caso della Gran Bretagna e dei Paesi Bassi. Nella prima, il massimo rischio tollerabile per ogni persona della comunità è di 10^{-5} all'anno, al di sopra di questo limite il rischio è considerato intollerabile, mentre al di sotto è considerato irrilevante in paragone agli altri rischi che un individuo corre. Nei Paesi Bassi, invece, si fa la differenza tra i rischi che corre la popolazione che vive sul luogo dell'incidente e chi ne vive al di fuori, per questi ultimi un fattore di rischio di 10^{-5} all'anno viene ritenuto accettabile. [194]

Ma per tornare all'energia dai nuclei e concludere il discorso su di essa, resta da dire che la sicurezza degli impianti nucleari è una condizione necessaria, ma non sufficiente a creare una maggior fiducia nei confronti di questa industria. Infatti risulta sempre più necessario trovare un nuovo modo di comunicare con la gente "con informazioni chiare, obiettive, convincenti, comprensibili e veritiere. Il rilancio del nucleare richiede la consapevolezza, da parte dell'opinione pubblica, circa la necessità di questa scelta e, da parte dei governi, il sostegno convinto e l'incoraggiamento per gli investimenti a lungo termine".[195] Perché ad oggi, davanti al problema di dover produrre energia in modo competitivo e pulito, e nonostante le molte speranze sulle energie rinnovabili, l'unica soluzione veramente realistica è che al di fuori dell'energia nucleare e di quella idroelettrica (la quale però ha possibilità di crescita ormai limitate), non esistono altre opzioni – economicamente valide e con minime emissioni di gas-serra - per la generazione di energia.

Del resto, anche il nucleare tradizionale presenta degli indubbi vantaggi: non emette gas-serra, ma solo scarichi termici (come tutti gli impianti termoelettrici) e leggere tracce di radioattività (come capita anche negli impianti a carbone, in percentuale minore al fondo naturale) ed è l'unica fonte di energia in grado di controllare e contenere tutte le proprie scorie. Infine, è stato calcolato che l'utilizzo dell'energia dei nuclei, negli ultimi 20 anni, ha permesso al mondo di evitare di immettere oltre 40 miliardi di tonnellate di anidride carbonica nell'atmosfera.[196] Infatti le centrali nucleari in funzione nel mondo permettono di risparmiare la combustione di 25 milioni di barili di petrolio al giorno e l'immissione di 2 miliardi di tonnellate di CO_2 nell'aria.

---

[194] Cfr.: Hirschberg S., Strupczewski A., *How acceptable? Comparison of accident risks in different energy systems*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 25-30.

[195] Cfr.: Fornaciari P., *Ripensiamo al nucleare*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21^mo^ secolo, Milano 1999, pp. 52-63.

[196] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21^mo^ secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

Inoltre, per fare un discorso veramente paritario, bisognerebbe forse calcolare anche le vittime dei combustibili fossili, invece di concentrarsi solo su quelle del nucleare. Per fare un esempio, ogni anno in Francia muoiono 120 persone per incidenti provocati dal gas naturale e nessuno chiede di eliminarlo, ma se quelle stesse 120 persone all'anno morissero in seguito ad incidenti nucleari, a quest'ora l'industria nucleare sarebbe già stata abbandonata da un pezzo. Lo stesso discorso vale per i casi di cancro ai polmoni causato dai gas di scarico, che miete migliaia di vittime per anno in tutto il mondo, ed quelli di cancro provocato da radiazioni, che costituisce una percentuale bassissima del numero totale di cancri; eppure l'opinione pubblica ed i giornali, per non parlare di molti "ambientalisti", si scagliano esclusivamente contro i secondi trascurando i primi.[197]
Viene dunque spontaneo chiedersi quante di queste "voci contro il nucleari" siano genuine e quante, invece, siano strumenti più o meno inconsapevoli di *lobby*, di produttori di petrolio, carbone e/o di gas naturale, che tutto avrebbero da guadagnare da un abbandono del nucleare, l'unica fonte veramente alternativa alle fossili. I prezzi del gas, oggi piuttosto bassi, crescerebbero a dismisura e i suoi produttori guadagnerebbero migliaia di miliardi di dollari e lo stesso capiterebbe per il petrolio, come già possiamo vedere in questi giorni.

Tab. 41 – Percentuale dell'opinione pubblica avversa al nucleare.

Paese	Tasso di elettricità di origine nucleare (%)	Avversione al rischio nucleare (%)
Irlanda	0	57
Danimarca	0	54
Portogallo	0	52
Grecia	0	51
Lussemburgo	0	48
Germania	33	48
Spagna	35	43
Italia	0	37
Regno Unito	20	35
Olanda	4	33
Belgio	59	31
Francia	73	22

Fonte: Charpak G., Garwin R.L., Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio, op. cit.

Dunque, se vogliamo riassumere gli aspetti positivi e negativi dell'energia nucleare in termini qualitativi possiamo dire che indubbi svantaggi sono gli alti costi di capitale richiesti, la necessità di soluzioni affidabili e sicure per lo smaltimento e stoccaggio dei residui radioattivi, la possibile proliferazione di armi nucleari in conseguenza di traffici illeciti. Ma, ciononostante, nel caso

[197] Cfr.: Gaspari A., *Un libro a favore delle centrali nucleari*, in "21[mo] Secolo. Scienza e tecnologia", n.2, luglio 1999, pp. 25.

dell'energia dai nuclei è assodato che: il combustibile è economico, la fonte è la più concentrata per la generazione di energia, le conoscenze scientifiche per ogni fase del suo ciclo sono ampie e ben note, non ci sono effetti ambientali come l'effetto-serra o le piogge acide e, come dimostrano numerose ricerche, i costi esterni per l'ambiente e per la salute sono molto bassi se paragonati ai costi diretti della produzione, tanto in caso di normale funzionamento quanto di eventuali incidenti.[198]

4. 3 – Rischi e danni delle fonti rinnovabili

Fare un'analisi dei danni relativi a queste fonti è a tutt'oggi molto difficile, poiché oltre ad essere molto numerose e per lo più in fase di sperimentazione, esse hanno impatti soprattutto locali. In generale, comunque, i loro danni durante lo stadio della produzione di elettricità sono molto bassi, se si escludono la biomassa (dove i materiali vengono bruciati sul luogo) e le centrali idroelettriche (dove le variazioni nei flussi d'acqua possono danneggiare l'ambiente).

In genere però vi è la tendenza a sovrasemplificare il discorso sulle fonti energetiche, vedendo le rinnovabili come sempre "buone" ed il nucleare come sempre "cattivo". Ma ciò che si vuol dimostrare qui di seguito è che, pur senza negare i tanti benefici, le fonti rinnovabili presentano anche numerosi svantaggi di cui si deve tener conto qualora si faccia un discorso di scelte energetiche a livello nazionale.

La maggior parte dei governi che appartengono all'*International Energy Agency* (IEA) sostengono attivamente le fonti rinnovabili, attraverso R&S, sussidi, esenzioni dalle tasse, premi, obbligazioni d'acquisto per le imprese, ecc. Ed in effetti, se si include anche la biomassa, le rinnovabili soddisfano fino al 18% della domanda mondiale di energia. Ora, bisogna però ricordare che la maggior parte dell'energia prodotta da queste fonti viene in realtà da impianti idroelettrici, anche se le altre forme di rinnovabili stanno guadagnando terreno[199], tanto che tra il 1990 e il 1995 la quantità totale di turbine a vento è raddoppiata, così come raddoppiano ogni cinque anni i pannelli fotovoltaici. Infine, l'EU si è posta l'obiettivo di portare, entro il 2010, la quantità di energia prodotta dalle rinnovabili dal 6% al 12%.[200]

Indubbi vantaggi di tutto ciò sono: l'evitata emissione di ben 1.500 tonnellate di anidride carbonica all'anno (circa il 7% delle emissioni di CO_2 dovute al settore energetico), una riduzione delle

---

[198] Cfr.: Anonimo, *Comparison of various Energy Sources*. Sito Internet: http://www.cannon.net/~gonyeau/nuclear/why.htm

[199] Anche a livello di investimenti privati: la Shell ha deciso di investire 500 milioni di dollari nel campo dell'energia solare, la BP sta rafforzando la propria presenza nel campo del fotovoltaico e la Enron è entrata nel settore eolico e solare. Cfr.: Silvestrini G., *Il tempo della transizione. Fonti rinnovabili*, in "Galileonet", anno III, n. 10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

[200] Cfr.: Priddle R., *Energy and sustainable development*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 2-6.

emissioni di anidride solforosa e di ossidi di azoto, un miglioramento nel rifornimento d'acqua e un aumento delle opportunità d'occupazione nelle aree rurali.

Ma, una volta che si consideri l'impatto dell'intero ciclo, e non solo gli effetti ambientali del loro funzionamento annuo, allora diventa chiaro che neppure le fonti rinnovabili sono prive di svantaggi e di rischi ambientali. Si tratta dunque di guardare alle conseguenze di ogni singola fase: estrazione delle risorse, trasporto, lavorazione dei materiali, costruzione dei componenti, ecc., fino alla chiusura dell'impianto e allo smaltimento dei rifiuti. E proprio qui sta la sorpresa, le energie rinnovabili creano ad ogni stadio (tranne quello del funzionamento) una quantità di emissioni nocive uguale o maggiore a quella delle altre fonti negli stessi stadi. Per quanto strano possa sembrare, ciò è dovuto al fatto che le rinnovabili usano delle risorse, per così dire, "sfuse" – contrariamente ai combustibili fossili e all'uranio che sono concentrati – e questo fa sì che per imbrigliare tali risorse "sfuse" e trasformarle in energia utile sia necessaria una quantità di macchinari e di strutture maggiori per ogni unità di elettricità prodotta.

Ecco perché per le rinnovabili si presenta particolarmente rischiosa la fase della produzione dei macchinari e della costruzione dell'impianto: la quantità di materiali necessari per ogni unità di elettricità effettivamente prodotta è molto più alta che per altri sistemi energetici. Ma anche in questo caso, per queste fonti di energia, mancano delle valutazioni precise in termini monetari.[201] Recenti comparazioni indicano che le quantità d'acciaio e di metalli non ferrosi necessari per ogni GWe/y per i sistemi energetici solari sono fra le 30 - 150 volte più grandi di quelli necessari per l'energia nucleare e perfino la quantità di calcestruzzo e di cemento è sei volte più grande per le tecnologie solari che per quelle nucleari. Inoltre, l'elettricità richiesta per produrre tutti questi materiali e costruire un impianto solare è molto grande, raggiungendo fino al 30% dell'elettricità totale che sarà prodotta nell'intero corso della sua vita.

Se però, nell'analisi introduciamo anche la fase di esercizio, allora è vero che le emissioni totali delle energie rinnovabili sono, di solito, in un rapporto di 1 a 10 con quelle delle fonti fossili. Ma non sempre, infatti se si paragonano, per l'intero ciclo di vita, le emissioni di CO_2 del fotovoltaico con un impianto a gas combinato, allora il rapporto è di 3 a 1.[202]

Infine, vi sono altri svantaggi, ambientali e non, oltre alle emissioni di gas nocivi.

Nel caso della costruzione di una grande centrale idroelettrica, per esempio, si avrà un notevole dislocamento della popolazione, la perdita di *habitat* naturali, cambiamenti nelle falde acquifere, la probabile perdita di molte vite in caso di cedimento di una diga, danni ambientali nel caso di un allagamento e successivi costi di risanamento del territorio e infine il fatto che, almeno nei paesi

---

[201] Cfr.: Wilson R., Holland M., Rabl A., Dreicer M., *The meaning of results. Comparative risk assessments of energy options*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999.

[202] Cfr.: Priddle R., Energy and sustainable development, op. cit.

industrializzati, la quasi totalità delle risorse idriche sono già sfruttate. Tra i vantaggi abbiamo, invece, il fatto che una volta costruite le dighe l'idroelettricità è economica e che, durante il funzionamento, non genera prodotti inquinanti.[203]

Dal canto suo, la produzione di energia attraverso le celle fotovoltaiche richiede l'utilizzo di alcuni materiali tossici e rischiosi per la costruzione di pannelli e specchi, grandi spazi per la generazione di quantità di energia piuttosto basse, ed è limitata alle sole zone perennemente assolate. Ma sicuramente il suo grande vantaggio è quello di avere una fonte pressoché illimitata e gratis.

Il geotermico può rilasciare metalli pesanti che potrebbero penetrare nel terreno ed inquinare l'acqua.

La biomassa, che essendo ancora nella sua "infanzia" potrebbe creare numerosi posti di lavoro, risulta però inefficiente se si usano piccoli impianti e sembra contribuire al riscaldamento del pianeta.

Le "fabbriche del vento" creano un frastuono assordante, interferiscono con le comunicazioni elettromagnetiche, per soddisfare la domanda dovrebbero avere una capacità di generazione d'energia pari ad almeno tre volte quella installata, necessitano di macchinari molto costosi da mantenere e di batterie per l'immagazzinamento dell'energia prodotta molto care ed sono fortemente dipendenti dalle condizioni climatiche, ma, come il sole, anche il vento è gratis.[204]

Insomma, ogni forma di energia presenta vantaggi e svantaggi e non è possibile fare delle semplificazioni eccessive, basandosi su pregiudizi esclusivi.

4.4 – Inquinamento atmosferico e radiazioni: le conseguenze

Svariati studi, portati avanti negli ultimi anni da diverse organizzazioni internazionali, hanno dimostrato che non solo alle fonti fossili sono imputabili le difficili condizioni di salute in cui versa il pianeta, e noi con esso.

Uno studio fatto dall'OCSE ha valutato che il 50% dell'inquinamento dell'atmosfera è dovuto, è vero, all'incenerimento dei combustibili fossili per la produzione di energia. Ma c'è dell'altro.

L'uso della biomassa, oltre alla devastazione dell'ambiente dovuto al fatto di bruciare indiscriminatamente alberi e cespugli, produce, nei locali chiusi, dei livelli molto alti di inquinamento dell'aria, con conseguenti infezioni respiratorie acute e cancro ai polmoni. Il contributo alla mortalità nei paesi in via di sviluppo, derivante dalla combustione della biomassa, è molto alto. In Cina, per esempio, causa oltre 1,4 milioni di morti premature ogni anno. Al contrario, le dosi supplementari di radiazione che arrivano alla popolazione dal funzionamento normale degli impianti ad energia nucleare sono soltanto una parte molto piccola delle variazioni del fondo naturale

---

[203] Cfr.: *Comparison of various Energy Sources*. Sito Internet: http://www.cannon.net/~gonyeau/nuclear/why.htm

[204] Cfr.: Comparison of various Energy Sources, op. cit.

(circa 1/1000).[205] Ulteriori risultati hanno indicato che il rischio relativo eccedente per tutti i tipi di cancro (a parte la leucemia) era -0,07, cioè non c'era un aumento del rischio. Insomma, non è stato trovato alcun aumento nell'incidenza di mortalità per cancro dovuto all'esposizione a basse dosi di radiazione.

Nel caso degli impianti nucleari, gli analisti hanno trovato che i rilasci di radiazioni , a livello delle operazioni di impianto, sono molto bassi. Le dosi attribuite ad altre fasi del ciclo del combustibile nucleare sono altrettanto piccole. Anche i rilasci di radiazioni a livello di impianti di riprocessamento sono molto piccoli, talvolta nemmeno misurabili.

La situazione è abbastanza diversa nel caso dell'inquinamento atmosferico, dove le conseguenze dirette sono state calcolate. Il rapporto fra la concentrazione delle sostanze inquinanti dell'aria e la mortalità è stato indicato drammaticamente in un certo numero di casi. Gli studi hanno indicato che i fattori di mortalità per esposizione cronica, derivanti da lunga esposizione all'inquinamento atmosferico, sono molto superiori a quelli derivanti da episodi più corti.

Il progetto di ExternE dell'UE nel 1997 ha preso in considerazione l'influenza delle anidridi solforose e degli ossidi d'azoto. Queste sostanze inquinanti si sono dimostrate produrre delle particelle secondarie che sono considerate altamente pericolose per la salute umana, poiché il loro piccolo formato facilita la loro penetrazione nei polmoni, con effetti cancerogeni e con frequenza maggiore rispetto alle radiazioni.

In seguito l'IAEA (*International Atomic Energy Agency*), in una guida sulla valutazione comparativa dei rischi sanitari derivanti dalla produzione di energia elettrica,[206] ha indicato la necessità di effettuare analisi complete dei rischi alla salute per tutte le fasi importanti della produzione di energia, non soltanto per quella del funzionamento della centrale elettrica. Purtroppo, però, anche il progetto ExternE (diretto a determinare i costi esterni di vari sistemi energetici) ha omesso di considerare i sistemi di riserva che sarebbero necessari per energia eolica e solare, se dovessero diventare contribuenti significativi all'offerta di energia. Il trascurare questi costi esterni migliora considerevolmente la situazione delle centrali elettriche eoliche e solari.

---

[205] I livelli del fondo naturale delle radiazioni variano da meno di 2 millisievert (mSv/y) l'anno fino a 5 mSv/y. I contributi supplementari derivanti da energia nucleare sono in genere di circa 1 - 3 microsievert l'anno, cioè 1/1000 delle variazioni nei livelli di fondo naturale di radiazioni. Cfr.: Strupczewski A., *Benefits & Burdens. Comparative assessments of emissions from energy systems*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 19-24.
[206] Si tratta di General Guidelines for the Comparative Assessment of Health and Environmental Impacts of Electrical Energy Systems, IAEA, 1997.

Tab. 42 – Impatti esterni degli impianti a combustibili fossili.

Impianto	Carbone	Lignite	Petrolio	Gas
Contenuto di zolfo	0,9%	0,3%	0,2%	0%
Emissioni (mg/kWh)				
SO_2	326	425	1611	3
NO_X	560	790	985	277
TSP	182	511	67	18
Costi esterni (milliECU/kWh)				
Danni alla salute (dovuti all'impianto/intero ciclo)	11,9/13,4	15,2/16,0	25,7/33,3	2,8/4,3
Incidenti	n. q.	n. q.	n. q.	n. q.
Altri impatti	0,16	0,23	0,64	0,04
Riscaldamento globale	3,4-125	4,0-149	3,5-166	1,5-56
Altri impatti	0,16	0,23	0,64	0,04
Costi esterni totali (per TWh)	17-138	20,2-165	37,5-166	5,8-60
Perdita totale di aspettativa di vita (anni di vita persa/TWh)	141,5	165	359	46

Nota: n. q. = non quantificato.
Fonte: Strupczewski A., *Benefits & Burdens,* op. cit.

La mancanza di dati sui problemi alla salute di origine non nucleare è stata usata spesso per giustificare l'esclusione di alcuni costi esterni sanitari per altri tipi di sistemi energetici. Un esempio tipico, come abbiamo già visto, sono i costi *front-end* delle rinnovabili. Le fonti di energia rinnovabile, effettivamente, sono filo-ambientali durante il funzionamento della centrale elettrica, tuttavia il loro sviluppo coinvolge spese enormi di materiale e di energia prima che l'impianto sia costruito. Dunque, anche la produzione di questa elettricità crea notevoli danni, cosicché gli impianti ad energia solare complessivamente contribuiscono all'inquinamento ambientale persino prima che comincino a produrre elettricità. Ma questo aspetto è stato troppo frequentemente tralasciato dalle considerazioni sulle fonti rinnovabili. E, altrettanto spesso, è stato omesso il fatto che mentre i prodotti radioattivi decadono ed infine spariscono, invece le sostanze chimiche inquinanti restano tossiche per sempre.

Insomma, numerosi risultati indicano che i rischi alla salute relativi alla produzione di elettricità sono minori per l'energia nucleare che per tutte le altre; in particolare tali danni si sono dimostrati essere di circa 100 volte inferiori rispetto al carbone ed al petrolio e parecchie volte più bassi rispetto al gas (si confrontino le tab. 42 e 43). Le valutazioni per le fonti rinnovabili, invece, rimangono incomplete, ma gli effetti stimati risultano essere di poco inferiori o superiori rispetto a quelli del nucleare.

Tab. 43 – Dosi collettive dai diversi stadi del ciclo nucleare (manSv/TWh).

Stadio		Francia	Germania	Regno Unito
Estrazione e lavorazione	Pubblico	0,177	0,1	0,1
	Dipendenti	0,112	0,0058	0,7
Generazione d'energia	Pubblico	1,88	0,63	0,407
	Dipendenti	0,352	0,39	0,028
Incidenti gravi (dose per reattore all'anno)	Pubblico	0,019- 2,9	0,019	n. q.
Riprocessamento	Pubblico	10,3	3,3	0,448
Smaltimento	Pubblico	0,166	0,14	n. q.
Totale		13,0	4,6	1,7
Perdita totale di aspettativa di vita (anni di vita persa/TWh)		9,8	3,0	1,3

Nota: n. q. = non quantificato.
Fonte: Strupczewski A., *Benefits & Burdens*, op. cit.

Nel fare un'analisi dei rischi collegati a tutte le forme di energia, dovendo tener conto delle diverse fasi del ciclo, si devono inserire anche gli incidenti che possono capitare al di fuori dei confini nazionali o regionali, come nel caso dell'estrazione e trasporto di carbone, petrolio e uranio. Vengono considerati incidenti gravi quelli hanno una o più di queste conseguenze: almeno cinque morti accidentali, almeno 10 feriti, almeno 200 persone evacuate, 10.000 o più tonnellate di idrocarburi rilasciati, più di 25 km^2 di necessaria pulizia a fondo di mare o terra e più di 5 milioni di dollari di perdite economiche.

I risultati sono inaspettati (si confronti la tab. 44), soprattutto per quanto riguarda gli impianti idroelettrici, che infatti mostrano l'indice di morti accidentali più alto se si fa la media tra quello dei paesi OCSE (0,004) e i paesi non-OCSE (2,19) per un valore di 0,9 morti accidentali per ogni gigawatt elettrico all'anno.

Tab. 44 – Danni alle persone durante gravi incidenti per le diverse fonti.

Danni (numero/GWe-anno)	Carbone OCSE	Petrolio OCSE	Gas OCSE	GPL OCSE	Idro OCSE/ non-OCSE	Nucleare LWR/RBMK
Morti immediate	0,13	0,39	0,066	1,8	0,004/2,19	0,0/0,16
Morti previste	n. q.	n. q.	n. q.	n. q.	n. q.	0,0005/46,5
Feriti	0,019	0,44	0,22	7,34	0,237/0,143	0/2,15
Evacuati	0	7,41	4,83	481	10,1/70	33/726
Danni monetari M$(GWe-anno)	0,035	0,94	0,11	1,92	0,7/0,5	1,3/1760

Nota: RBMK sono le centrali nucleari dell'ex-URSS.
n. q. = non quantificato
Fonte: Hirschberg S., Strupczewski A., *How acceptable? Comparison of accident risks in different energy systems*, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 25-30.

Nel caso dell'energia nucleare invece, sono le differenze nella progettazione degli impianti ad avere un impatto decisivo sulla sicurezza. Infatti, per i LWR e i HWR non si sono riscontrate morti accidentali immediate (l'unico incidente è stato quello a Three Mile Island nel 1979). Diverso è invece il caso dei reattori tipo Chernobyl (cd. RBMK), i quali si basano su progetti, soluzioni tecniche e *standard* di sicurezza completamente diversi da quelli occidentali, dove si hanno 0,16 morti accidentali immediate per gigawatt all'anno.[207]

Nei paesi OCSE, i tassi più alti di morti immediate sono associati al GPL, seguito da petrolio, carbone, gas naturale, energia idroelettrica e nucleare. In ogni caso i risultati mostrano come i rischi delle installazioni non-nucleari siano molto maggiori rispetto a quelli delle centrali nucleari.

4.4.1 – Scorie pericolose anche dalle altre fonti

Mentre si sono fatte numerose e interminabili diatribe sulle scorie prodotte dall'energia nucleare, purtroppo si è troppo spesso tralasciato di portare avanti le stesse considerazioni per i residui di altre fonti energetiche, residui che spesso sono nocivi (i cd. residui non-radioattivi) e talvolta anche radioattivi. È difficile capire la logica che sta dietro a questo diverso "trattamento" delle scorie, in quanto anche quelle di origine non-nucleare possono contenere delle sostanze che, se non vengono gestite in modo appropriato, pongono seri rischi alla salute umana, anche a lungo termine.

In particolare, anche i residui provenienti da cicli energetici non-nucleari, contengono numerosi radionuclidi che derivano da materiali (radioattivi per natura) che vengono estratti assieme al combustibile e che si trovano poi in forma concentrata nelle scorie. Non solo, ma in termini di salute tanto i radionuclidi quanto un gran numero di sostanze non-radioattive sortiscono gli stessi effetti: malfunzionamento dei reni, danni al cervello, cancro e mutazioni genetiche. Dunque le considerazioni su entrambi questi tipi di scorie dovrebbero essere improntate agli stessi punti di riferimento: i loro potenziali effetti sulla salute umana ed il miglior stoccaggio possibile onde prevenire questi effetti.

---

[207] Non si ripeterà mai abbastanza quanto l'opinione pubblica sia stata ingiustamente influenzata dall'incidente di Chernobyl, poiché troppo di rado sono stati messi in luce gli aspetti tecnici completamente diversi. Ad ogni modo, può risultare indicativo il fatto che nel 1989 le autorità inglesi abbiano ritenuto che le differenze nei progetti tra i PWR (occidentali) e i RBMK (sovietici) siano talmente fondamentali, che le esperienze ricavate dai reattori russi non possano essere usate per giudicare la sicurezza degli impianti nucleari occidentali.

Tab. 45 – Paragone tra la concentrazione di sostanze potenzialmente nocive da diversi cicli energetici.

Materiale	Cromo (mg/kg)	Mercurio (mg/kg)	Nichel (mg/kg)
Ceneri di carbone	1-200	n. q.	50-300
Fango da acqua di scarico	< 1- 10.000	0,1-3	28-20.000
Fango da desolforazione di gas di combustione	3-210	< 1-70	20-240
Acciaio da smantellamento di centrali nucleari	3.000	n. q.	2.000
Ceneri e fango da rifiuti urbani	200-2.300	50	50-180
Fango da olio di raffineria	10-5.080	2,1-4	40-2.000
Limiti	70	5	1.000

Nota: limiti stabiliti dalla Commissione Europea
Fonte: Seitz R., Finding common ground. Assessing wastes from fuel chains of electricity generation, in "IAEA Bulletin", n. 41, gennaio 1999, pp. 35-42.

Tab. 46 – Vari tipi di deposito per i rifiuti solidi da diversi cicli energetici.

Residui	Superficie	Bassa profondità	Geologico	Oceano
Nucleare				
- radioattivi	no	sì	sì	no
- non-radioattivi	no	sì	sì	no
Carbone/lignite				
- radioattivi	sì	sì	sì	no
- non-radioattivi	sì	sì	sì	no
Petrolio/gas				
- radioattivi	sì	sì	sì	sì
- non-radioattivi	sì	sì	sì	sì

Nota: con deposito a bassa profondità si intende a poche decine di metri sottoterra.
Fonte: Seitz R., *Finding common ground*, op. cit.

Il problema, infatti, è che molte scorie derivanti dai vari cicli energetici e che contengono materiali naturalmente radioattivi, non sono soggette ad una stima precisa che determini i potenziali rischi associati al loro smaltimento in luoghi specifici. Ma, come mostra la tab. 46, molte di queste scorie presentano delle concentrazioni di elementi in eccesso rispetto ai limiti stabiliti dall'EU e dunque pericolose per la salute. Insomma, persino il semplice interramento a bassa profondità potrebbe non essere sufficiente per alcune ceneri di carbone e per altre comuni scorie che oggigiorno vengono lasciate all'aria aperta.

Tanto per fare un esempio, nel 1982, negli Stati Uniti, le centrali elettriche a carbone hanno liberato 801 tonnellate di uranio e 1.971 tonnellate di torio. Non solo, ma nel bruciare carbone si liberano anche i derivati dei suddetti elementi, e cioè radio, radon, plutonio, ecc., si ha così che, in realtà, l'esposizione della popolazione alle radiazioni è 100 volte maggiore per una centrale a carbone (che non ha dispositivi di schermatura) che per una nucleare.[208] Ma anche nel caso delle più moderne centrali non nucleari, che non rilasciano più questi elementi radioattivi nell'atmosfera, c'è da ricordarsi che essi fanno comunque parte delle ceneri, le quali, come già detto, non sono sottoposte a nessun tipo di trattamento. Dunque, sostituire una centrale nucleare con una a combustibili fossili, per ridurre le quantità di radiazioni a cui siamo esposti, rischia di essere un imbroglio.

Nel caso delle fonti fossili il ciclo del combustibile comprende: l'estrazione nelle miniere, il trasporto, la raffinazione e la combustione. Quest'ultima, come ben sappiamo, emette sì calore, ma anche anidride carbonica, ossidi di azoto e di zolfo nell'atmosfera e, nel caso del carbone, scorie sotto forma di ceneri, le quali contengono materiali radioattivi naturali.
Ma può anche essere utile sapere che una centrale a carbone, che produce la stessa energia di una centrale nucleare da, mettiamo, 900 MW, brucia ogni 13 secondi ben una tonnellata di carbone, il che significa 2 milioni di tonnellate all'anno, mentre una centrale usa meno di una tonnellata di uranio 235, cioè 200 tonnellate di uranio naturale, contenute in 200.000 tonnellate di minerale, che è una quantità alta, ma pur sempre inferiore di un fattore dieci a quella del carbone.

Concludendo, dunque, ogni singola fonte energetica presenta degli svantaggi di vario tipo ed a più livelli: residui, ambiente, salute umana, approvvigionamenti, sicurezza nel mondo. Inoltre, come abbiamo visto, neppure le energie rinnovabili, spesso ritenute pulite per antonomasia, sono poi tanto "pulite" se considerate nell'interezza del loro ciclo. Eppure, una soluzione a molti, per non dire a tutti, questi problemi, inizia a profilarsi all'orizzonte: si chiama *Energy Amplifier* e tutto ciò di cui necessita è solo un po' di fiducia e di sostegno, onde poter portare a termine la R&S necessaria a farla divenire realtà.

---

[208] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

CAPITOLO 5
L'*ENERGY AMPLIFIER* E LA R&S

5.1 – Vantaggi dell'*Energy Amplifier* in termini di sicurezza e ambiente

Abbiamo visto come ogni singola forma di energia presenti degli indubbi svantaggi dal punto di vista ambientale e non solo. Ma per avere un quadro completo della situazione può qui essere utile riassumerli:

- fonti fossili: esaurimento delle riserve ed emissioni di gas-serra;
- fonti rinnovabili: difficoltà nello sfruttamento intensivo delle energie eoliche e solari, alte emissioni di gas inquinanti e sostanze chimicamente nocive durante la costruzione di impianti e macchinari, rumore (per l'energia eolica), impatto paesaggistico;
- energia nucleare: possibili incidenti di criticità, problemi di traffico illecito di plutonio per armi nucleari, scorie radioattive e loro smaltimento, avversione da parte dell'opinione pubblica.

Ora, quello che ci proponiamo di dimostrare è come l'*Energy Amplifier* permetta di risolvere in maniera definitiva una buona parte di questi problemi derivanti dalle fonti, tradizionali e non, di energia.

5.1.1 – *Energy Amplifier* vs. fonti fossili e rinnovabili

Per quanto riguarda l'aspetto del probabile esaurimento di metano e petrolio nel corso di questo secolo, l'EA si dimostra una soluzione vantaggiosa sia perché, qualora commercialmente disponibile, permetterebbe di utilizzare questi due combustibili in quantità minori e solo per usi diversi dalla produzione di elettricità, sia perché si basa sul ciclo del torio, elemento che, come abbiamo avuto modo di dire più volte, è molto abbondante in natura e le cui riserve sono diffuse in tutto il mondo.

La questione dell'effetto serra, poi, è presto risolta, poiché l'*Energy Amplifier* (come d'altra parte ogni forma di energia nucleare) non ne può provocare le cause, visto che non si basa su reazioni chimiche dove si bruciano sostanze che contengono carbone, azoto, zolfo, ecc., e che, a contatto con l'aria, formano i pericolosi gas-serra. Al contrario, anche l'EA, come i reattori tradizionali, basandosi su reazioni che avvengono all'interno dei nuclei di combustibili non fossili, fa sì che non vi siano emissioni di gas inquinanti. Inoltre, da un suo utilizzo estensivo, si trarrebbe il beneficio di evitare la produzione di ampie quantità di gas pericolosi per la salute del pianeta.

Per quanto concerne invece la soluzione ai problemi delle fonti rinnovabili, il discorso è molto semplice:

- il torio (opportunamente trattato) è una fonte energetica concentrata e dunque facilmente sfruttabile (contrariamente all'energia solare o eolica);
- la quantità di macchinari necessaria a far funzionare l'EA sarebbe più o meno la stessa che per le centrali convenzionali e, quindi, non ci sarebbero grosse differenze tra il costruire un impianto, mettiamo, a carbone o un *Energy Amplifier*, mentre nel caso delle rinnovabili i mezzi richiesti sarebbero notevolmente maggiori;
- infine non ci sarebbero problemi di rumorosità degli impianti, né impatti paesaggistici particolari visto che, di nuovo, la grandezza dell'EA e l'estensione del suo sito sarebbero simili a quelle dei normali reattori nucleari.

Inoltre l'EA è anche una forma di energia nucleare più accettabile dal punto di vista ambientale. In particolare, la dose collettiva integrata (locale e regionale) è di circa 2,75 manSv/GWe anno, che è di un ordine di grandezza più piccolo della emissione radionucleide dall'incenerimento del carbone ed è paragonabile a quella del petrolio e dell'energia geotermica.[209]

5.1.2 – Svantaggi dell'energia nucleare tradizionale e soluzioni dell'*Energy Amplifier*

È stato detto che l'energia nucleare, per essere accettabile, deve "poter competere economicamente con le altre fonti, avere un impatto ambientale accettabile e un livello di rischio talmente basso che un incidente catastrofico sia pressoché impensabile"[210] e, infine, deve impedire la proliferazione delle armi nucleari. Appare dunque chiaro come l'EA, seppur concepito come alternativa fonte di energia, risponda in pieno e senza riserve ai "*diktat*" imposti al settore nucleare.
Tanto è vero che sarebbe letteralmente impossibile il verificarsi di incidenti di criticità all'interno dell'*Energy Amplifier*, poiché esso opera in modo sottocritico. Infatti, mentre nei reattori convenzionali il coefficiente di criticità deve essere per forza pari a uno ($k_{eff} = 1$) altrimenti non si sarebbe in grado di generare energia né di controllarla, invece nell'EA questo fattore è costantemente e stabilmente inferiore a uno (k_{eff} = 0,95-0,97) e dunque la reazione per avvenire ha bisogno di una sorgente esterna di neutroni.

In questo modo l'EA permette di raggiungere un alto livello di sicurezza, poiché non vi può fisicamente essere una sovrapproduzione di neutroni capaci di sostenere una reazione a catena. Inoltre, la presenza come refrigerante del piombo liquido fa sì che questo, in caso di surriscaldamento del reattore, si dilati e quindi vada a bloccare l'arrivo dei protoni, penetrando all'interno del canale del fascio.

---

[209] Cfr.: Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al., *Conceptual design of a fast neutron operated high power Energy Amplifier,* CERN/AT/95-44 (ET), CERN, Geneva 1995.
[210] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

Per quanto riguarda il problema del plutonio e del suo possibile traffico per costruire armi, anche qui la soluzione è piuttosto semplice e sicura.

Prima di tutto, il fatto che l'*Energy Amplifier* debba essere ricaricato solo una volta ogni cinque anni permetterebbe un maggiore controllo da parte delle autorità pubbliche, che potrebbero assistere alle operazioni, accertandosi della "destinazione" del combustibile usato e quindi del plutonio in esso contenuto.

Inoltre, l'Amplificatore è in grado di sfruttare ed eliminare completamente il plutonio militare senza necessitare di particolari accorgimenti tecnici, in quanto grazie alla spallazione ogni volta può usarne piccole quantità, estraendone comunque energia. Infatti, l'utilizzo dell'acceleratore, consentendo anche di usare combustibili MOX[211] (qui plutonio e torio), permette di trasmutare gli elementi, eliminando così tutti i problemi delle riserve di plutonio derivanti dal disarmo nucleare.

Infine, la possibilità di sfruttare il plutonio militare, che ammonta a varie centinaia di tonnellate, aprirebbe anche una strada economicamente remunerativa. Si pensi infatti che l'energia potenziale contenuta in 250 Ton di plutonio militare è pari a 3.500 milioni di barili di petrolio, equivalenti più o meno alla produzione annua dell'Arabia Saudita. E, grazie all'EA, saremmo in grado di sfruttarla interamente, bruciando per di più completamente il poco "pacifico" plutonio.[212]

Per gli svantaggi riguardanti il nucleare restano ancora da trattare le questioni delle scorie radioattive e dell'avversione dell'opinione pubblica, ma entrambe meritano un discorso a sé stante.

5.1.3 – Uso dell'*Energy Amplifier* come inceneritore: il caso spagnolo

Abbiamo più volte accennato che, qualora l'EA venisse impiegato per incenerire i rifiuti più pericolosi dei reattori nucleari, si otterrebbe il doppio vantaggio di smaltire le scorie radioattive a lunga vita (eliminando così il problema del loro immagazzinamento in depositi geologici e del loro preventivo trattamento) e contemporaneamente di produrre energia durante il processo inceneritore.

Ma la prova più convincente viene da uno studio dell'*équipe* del CERN che ipotizzava di usare un *Energy Amplifier* per eliminare le scorie del parco nucleare spagnolo.

La Spagna ha una capacità nucleare installata di 7,1 GW, prodotti dai suoi nove reattori. Le barre di combustibile irraggiato immagazzinate nel 1995, presentano una composizione riassunta nella tab.47 ed entro il 2030 si arriverebbe a 9.628 tonnellate di combustibile usato. Per quanto concerne i prodotti della fissione, si sa che dopo un raffreddamento di 15 anni, la maggior parte della radioattività è concentrata in due soli isotopi ^{90}Sr e ^{137}Cs, il cui periodo radioattivo è di 30 anni. Altri

---

211 L'acronimo MOX sta per *Mixed OXide fuels*, cioè combustibili ad ossidi misti.

212 Cfr.: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

prodotti tuttavia hanno una vita molto più lunga, tra i principali ci sono il ^{99}Tc ($2\cdot10^5$ anni) e lo ^{129}I ($1,6\cdot10^7$ anni).

Tab. 47 – Scarti nucleari prodotti nel 1995 e previsti per il 2020.

Elemento	Frazione	Residui nel 1995 (ton)	Residui nel 2029 (ton)
Uranio	94,771	1.652,918	6.296,832
Nettunio	0,059	1,032	3,931
Plutonio	0,951	16,594	63,216
Americio	0,092	1,610	6,134
Curio	0,00217	0,038	0,144
Frammenti di fissione	4,124	71,933	274,032

Fonte: Rubbia C., Buono S. et al., Fast neutron incineration in the Energy Amplifier as alternative to geological storage: the case of Spain, op. cit.

Il comportamento dei vari componenti giustifica la strategia generale della proposta di Rubbia:

- i transuranici, che rappresentano solo l'1% della massa, hanno al contrario la radiotossicità più lunga. Il loro incenerimento per fissione (che produce inoltre dell'energia) è dunque vantaggioso. Inoltre è anche possibile trasformare in elementi stabili, e quindi non pericolosi, i più nocivi prodotti della fissione a lunga vita (^{99}Tc e ^{129}I);
- gli altri prodotti della fissione, così come del resto le guaine dei combustibili attivi saranno oggetto d'un immagazzinamento secolare sorvegliato fino a quando la loro radioattività residua non autorizzerà il loro spostamento (dopo diluizione) in un sito ad accesso libero (classe A);
- la maggior parte delle scorie è costituita da uranio che può essere riutilizzato dopo la separazione.

In questo modo si otterrebbe sia di evitare le spese e i problemi derivanti dallo stoccaggio delle scorie in depositi geologici, sia di generare una quantità di energia utilizzabile per qual si voglia scopo.

Metodo d'azione

Il funzionamento dell'EA come inceneritore esige una procedura precisa.[213]

Le scorie provenienti da un reattore tradizionale vengono prima trattate, ad esempio, col metodo piroelettrico, il quale permette di estrarre dal combustibile usato:

- uranio puro (con circa l'1,1% di uranio 235) che costituisce il 95% dei residui e che può essere riutilizzato come combustibile per i normali reattori;

[213] Per un'analisi dettagliata dei parametri tecnici e delle loro implicazioni economiche cfr.: Rubbia C., Buono S. et al., *Fast neutron incineration in the Energy Amplifier as alternative to geological storage: the case of Spain*, CERN/LHC/97-01 (EET), CERN, Geneva 1997. E anche cfr.: Klapisch R., *Vers une approche nouvelle de l'énergie nucláéaire*. Contribution à la séance du 23 Mai 1997 du groupe de travail "Ethique de l'énergie: le devoir de recherche", CERN, Geneva 1997, (per gentile concessione del CERN).

- i frammenti di fissione (circa il 4% della massa totale delle scorie), la cui radioattività è data soprattutto dallo stronzio e dal cesio che hanno un tempo di dimezzamento di 29,1 e 30,2 anni rispettivamente;
- i transuranici (circa l'1% della massa) che sono i residui con la radioattività più lunga e che, mischiati con il torio, diventano una parte del combustibile dell'EA finché non vengono completamente eliminati.

L'utilizzo del torio è essenziale, poiché distingue la pratica dal metodo di riprocessamento corrente (detto MOX), nel quale il plutonio è incluso in una matrice di ^{238}U che contribuisce alla formazione del plutonio e nello stesso tempo alla sua distruzione, sebbene in misura limitata visto il basso tasso di incenerimento poiché si parte dall'uranio. Al contrario l'impiego di una matrice di torio nell'EA conduce ad tasso d'incinerimento dei transuranici aumentato di 400 kg all'anno, per una capacità termica di 1,5 GW. La presenza del torio conduce inoltre alla formazione di ^{233}U, che può essere recuperato per formare o del combustibile dei reattori attuali – avrà lo stesso ruolo del ^{235}U – o per servire da innesco a dei nuovi Amplificatori d'Energia con l'esclusivo scopo di produrre elettricità. Alla fine del ciclo (2 anni a potenza nominale) si ritrattano i residui dell'EA , si estraggono i prodotti della fissione e l'uranio 233 prodotto, si riaggiunge del torio fresco (circa 700 kg) così come delle scorie transuraniche supplementari (850 kg).

Con l'incenerimento completo dei residui attinidi, i prodotti della fissione a lunga vita costituiscono la maggior parte della radioattività restante, la quale sussiste per tempi molto lunghi, ma che è già stata ridotta di circa 1/20.000. Possiamo diminuire ancora d'un ordine questa radiotossicità millenaria trasformando, per cattura neutronica gli isotopi più fastidiosi, che sono il ^{99}Tc ($2 \cdot 10^5$ anni) e lo ^{129}I ($1{,}6 \cdot 10^7$ anni), in elementi stabili, arrivando così a 1/200.000 della radioattività originaria. Le quantità di questi isotopi provenienti dalla discarica di un reattore sono di 39,6 kg all'anno di ^{99}Tc e di 9,2 kg all'anno di ^{129}I.

In conclusione le procedure scelte permetterebbero di ridurre sensibilmente la radiotossicità delle frazioni "millenarie" (transuranici e prodotti della fissione a lunga vita) delle scorie provenienti dal combustibile tradizionale e di portarla allo stesso livello di quella delle ceneri di carbone. Tale attività residua permetterebbe di considerare la possibilità che il deposito geologico profondo venga rimpiazzato da uno in superficie di classe A, cioè su un sito a libero accesso. Per fare questo ci sarebbe bisogno di una diluizione delle scorie (per esempio nel calcestruzzo) in un volume di $4m^3$ per tonnellata di combustibile irradiato. In totale, per le circa 2.000 tonnellate di combustibile trattato dall'EA in 40 anni, il volume di immagazzinamento sarebbe dell'ordine di $8.000m^3$, cosa che appare molto modesta in rapporto alle installazioni già esistenti.

Deborah Sessano

In particolare, poi, la quantità finale di residui – dopo il trattamento di tutte le scorie previste per il 2029 in Spagna – sarebbe pari ad un volume di 60.000 m^3, che è circa l'1% del deposito americano di classe A ed è più o meno uguale alla capienza del deposito spagnolo (50.000 m^3) di classe A.
Inoltre, la procedura di incenerimento delle scorie appena descritta porterebbe alla generazione di una quantità addizionale di energia pari al 40% dell'energia prodotta dal reattore che ha generato quelle stesse scorie. Per l'esattezza nel caso spagnolo sarebbero necessari cinque *Energy Amplifier* per bruciare in 37 anni tutte le scorie provenienti dal suo parco nucleare, in questo modo verrebbero prodotti 3.125 GW (cioè 5x0,625 GW) di energia supplementare, che corrisponderebbero ad un incremento del 15% della produzione totale di energia in quella nazione. Tra l'altro, la domanda di elettricità in Spagna cresce ad un tasso medio del 3% e quindi l'energia aggiuntiva prodotta dall'EA troverebbe facilmente un impiego sul mercato.

Considerazioni economiche e strategie possibili

In tutti i paesi con imprese di ritrattamento proseguono attivamente gli studi sulle soluzioni dell'immagazzinamento a lungo termine delle scorie nucleari. E' ben risaputo che emergono spesso delle opposizioni politiche capaci di rimettere in discussione il programma di immagazzinamento, il cui inizio è previsto intorno al 2020-2030. Forse meno conosciute, ma sicuramente altrettanto preoccupanti sono le incertezze finanziarie sui costi dell'immagazzinamento.
Uno studio dell'OECD-NEA mostra una grande dispersione delle stime nei diversi paesi. Per quanto concerne la Spagna, le stime si pongono nella media, a circa 800$ per kg di combustibile. Su questa base il costo dell'immagazzinamento delle scorie provenienti dall'area spagnola è previsto essere di circa 7,7 miliardi di dollari.
In confronto, l'incenerimento necessiterebbe di una capacità di 5 moduli EA di 1.500 MWatt termici ciascuno permettendo l'incenerimento completo in 37 anni. La valutazione dell'investimento necessario è evidentemente ancora aleatoria.
Secondo le stime del gruppo di Rubbia, cinque *Energy Amplifier* dovrebbero avere un costo di 4,7 miliardi di dollari.
Una valutazione diversa è invece stata effettuata dal Comitato Scientifico e Tecnico dell'EURATOM che prevede un sovraccosto del 20% in rapporto al prezzo (1,8 miliardi di dollari) d'una centrale francese da 3.800MW. Con queste condizioni si arriva, per cinque EA, a 4,2 miliardi di dollari, compresa la produzione d'elettricità per questi impianti da 7.500 MW. Bisogna poi aggiungere il prezzo della struttura per il ritrattamento, stimata in un miliardo di dollari per 300 tonnellate all'anno, l'installazione per il raffreddamento secolare (0,25 miliardi di dollari) e l'immagazzinamento di classe A (0,45 miliardi di dollari). L'investimento (probabilmente stimato per eccesso) arriva a circa 5,9-6,4 miliardi di dollari, che sono da paragonarsi ai 7,7 previsti per lo stoccaggio geologico;

l'esborso necessario risulta quindi molto minore ed inoltre può essere interamente finanziato con i fondi destinati al deposito geologico.

Ma la soluzione dell'incenerimento comporta anche altri benefici:

- si avrebbe una produzione d'elettricità a delle condizioni finanziarie molto vantaggiose. In effetti, la maggior parte del prezzo dell'elettricità nucleare corrisponde al prezzo del capitale investito. Qui questa componente sparisce e non restano che i costi del combustibile e del mantenimento. In totale, l'EA produrrebbe dell'elettricità a meno di 10 USmill/kWh, questo per una produzione totale di energia elettrica pari a $2{,}46 \cdot 10^{10}$ kWh in circa 40 anni;
- l'uranio recuperato per il ritrattamento (più di 6.000 tonnellate) è arricchito all'1,1% e possiede un valore commerciale di 175 $ per kg. Si recupera così più di un miliardo di dollari tra il suo valore e quello che si risparmia su parte dell'arricchimento e sull'acquisto dell'uranio naturale;
- l'^{233}U prodotto dall'EA (875 kg/anno per i 5 moduli) può essere utilizzato per arricchire il combustibile utilizzato per i reattori tradizionali. Il valore commerciale di questa produzione può essere stimato in circa 1,3 miliardi di dollari per tutta la durata dell'operazione;
- la produzione totale di energia dall'incenerimento dell'intero stock di scorie spagnole – in 37 anni – sarebbe pari a $2{,}85 \cdot 10^{8}$ Tep.[214]

Dunque la distruzione per incenerimento delle scorie nucleari a lunga vita è un obiettivo importante, ma la sua fattibilità deve essere confermata attraverso la costruzione di un prototipo di taglia ridotta, prima che un impianto di taglia industriale possa essere costruito. Una simile installazione pilota (d'un prezzo di 200 milioni di EURO circa) potrebbe essere costruita in 5 anni.[215] Se questa installazione funzionasse verso il 2003, un'installazione di taglia industriale potrebbe entrare in funzione già a partire dal 2010-2015. La distruzione delle scorie attinidi durerebbe così fino al 2050 circa. L'esperienza accumulata durante questo lasso di tempo permetterebbe chiaramente di giudicare la validità (economica e tecnica) dell'impianto in materia di produzione d'energia, sebbene le previsioni fin qui date sembrino dimostrare la sua competitività sotto ogni aspetto.

---

[214] Cfr.: Rubbia C., Buono S. et al., Fast neutron incineration in the Energy Amplifier as alternative to geological storage: the case of Spain, CERN/LHC/97-01 (EET), CERN, Geneva 1997.

[215] Cfr.: Klapisch R., *Vers une approche nouvelle de l'énergie nucléaire*. Contribution à la séance du 23 Mai 1997 du groupe de travail "Ethique de l'énergie: le devoir de recherche", CERN, Geneva 1997, (per gentile concessione del CERN).

Concludendo, dunque, il gruppo di Rubbia si è reso conto che per ottenere i fondi necessari a continuare la ricerca, l'EA deve essere oggi proposto principalmente come inceneritore di scorie e solo marginalmente come produttore di energia elettrica, con una sua possibile connessione alla rete di fornitura di elettricità.[216] Inoltre, viene spesso sottolineato che la sua costruzione all'interno dei siti delle attuali centrali nucleari permetterebbe di evitare i costi di trasporto delle scorie ed inoltre di aggiungere un'ulteriore produzione di energia, ottenendo così notevoli vantaggi economici.
Si tratta dunque di una sfida che deve essere necessariamente affrontata. E proprio per questo motivo fa male vedere come chi porta avanti questa battaglia debba difendersi da un pubblico malinformato: "Pertanto, e contrariamente ad un'opinione generalizzata, [l'EA] è un progetto altamente ecologico e favorevole all'ambiente. Certamente, in questo sistema si devono manipolare dei materiali radioattivi (i nostri residui); il punto è che questi materiali già esistono ed è quindi imprescindibile la loro eliminazione".[217]

5.1.4 – L'*Energy Amplifier* è utile anche alla medicina

Un'altra delle ricadute positive dell'EA, in quanto fonte di neutroni veloci, consiste nella possibilità di produrre anche dei radioisotopi medici, che oggi sono molto costosi ma anche molto richiesti dal mercato. Questi radioisotopi potrebbero essere creati introducendo degli appositi bersagli e permetterebbero delle notevoli economie nella loro commercializzazione, in quanto prodotti sfruttando impianti costruiti per altri scopi.
Infatti, all'interno dell'*Energy Amplifier* potrebbe anche essere generata una notevole quantità di tecnezio 99, il radioisotopo più frequentemente usato in medicina. Invece di usare un dispendioso reattore per generare i prodotti di fissione, basterebbe costruire un piccolo impianto di produzione, in pochissimi metri quadrati, con un bersaglio di piombo sul quale verrebbe diretto un fascio di protoni a 1,5 mA. Un simile impianto, per quanto piccolo, produrrebbe una quantità di tecnezio sufficiente per un'intera nazione e a costi ridottissimi.[218]

5.1.5 – Il difficile rapporto tra energia nucleare ed opinione pubblica: quale la differenza nei confronti dell'*Energy Amplifier?*

Come abbiamo avuto modo di appurare in precedenza, la visione dell'energia nucleare da parte dell'opinione pubblica è profondamente mutata nel corso degli ultimi decenni: da fonte energetica

---

[216] Cfr.: Leonardi A., *Rubbia: "Il mio nucleare pulito"*, in "Galileonet", 5 dicembre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html
[217] Cfr.: Anonimo, *Preguntas mas frecuentes*. Sito Internet: http://www.laesa.com/faq.html
[218] Cfr.: Lung M., *Reactors coupled with accelerators*, Institute for Transuranium Elements, 1996. Sito Internet: http://itumagill.fzk.de/ADS/mlungACC.htm

capace di salvare il mondo dalla schiavitù del petrolio ad innominabile tabù, simbolo di un'opzione portatrice di ogni male e pericolo.

Anzi, proprio riguardo alle contestazioni dei verdi nei confronti degli esperti di nucleare, già nel 1980, Edoardo Amaldi, uno dei più noti fisici italiani, aveva affermato: "L'argomento che ci si debba guardare dai competenti in quanto possono essere non completamente obiettivi [e dunque 'uomini di parte'], è veramente straordinario, soprattutto se eretto a norma di comportamento di fronte ad importanti decisioni; esclusi i competenti, restano i meno competenti, cioè gli incompetenti. Al limite, più grave è il problema e più incompetenti dovrebbero essere le persone maggiormente ascoltate o che si debbono assumere la responsabilità delle decisioni: in qualunque paese del mondo questa sarebbe un'ottima barzelletta !".[219]

Certo, nel passato gli incidenti ci sono stati e gli sbagli sono stati commessi, ma, come abbiamo visto, ogni forma di energia ha provocato i suoi danni e ha avuto le sue vittime. Purtroppo però, il nucleare fa notizia, e sempre in negativo. Per ogni minimo problema (anche senza importanza) che si ha in una centrale, si spendono fiumi di parole, mentre ogni progresso in questo settore passa completamente inosservato alla stampa popolare. Ma non solo, persino le ricerche in atto per creare un nucleare veramente sicuro sono sottoposte a regime di silenzio, se si escludono i (purtroppo) rari inserti scientifici delle maggiori testate, le (purtroppo) poco lette riviste di divulgazione scientifica e l'ancor meno letta (dal grande pubblico) stampa specializzata. Eppure le buone notizie ci sono.

Dunque, il problema che si pone anche all'*Energy Amplifier*, come ad ogni nuova forma di energia nucleare, è l'atteggiamento sospettoso e sfavorevole dell'opinione pubblica e della stampa, che si influenzano a vicenda, in una sorta di circolo vizioso senza fine. Tutto questo, però, potrebbe essere cambiato attraverso un serio impegno delle organizzazioni scientifiche. In particolare, dovrebbero essere intraprese alcune iniziative riguardanti:

- una maggiore e corretta informazione, nel senso che non esistono forme di generazione di energia completamente sicure e prive di rischi, neanche quelle più tradizionali ne sono totalmente esenti. Dunque, non bisogna accanirsi contro un'unica forma di energia "dimenticando" i problemi legati alle altre o alla totale assenza di fonti energetiche,
- le scorie nucleari. Anche qui sembra che si tralasci un po' troppo spesso il fatto che ogni fonte energetica tradizionale crea scorie di vario tipo, alcune delle quali (come nel caso delle ceneri di carbone e dei gas inquinanti emessi dall'incenerimento di petrolio e metano) sono altrettanto tossiche di quelle nucleari e, diversamente da queste ultime, vengono rilasciate direttamente nell'atmosfera.

---

[219] Citato in Fornaciari P., *L'Italia entra in Europa senza energia*, 21mo Secolo, Scienza e tecnologia, n.2, luglio 1999, pp.. 33-35.

– la sicurezza delle centrali, che nel caso dell'EA – e diversamente da quelle tradizionali – è garantita da leggi fisiche immutabili e non da argomentazioni probabilistiche.[220]

Dunque al pubblico non vengono dati i mezzi e le informazioni per conoscere e capire il nucleare. Ma senza comprensione da parte del pubblico, non c'è accettazione e senza accettazione non c'è evoluzione nucleare che tenga, indipendentemente dai contributi che potrebbe dare per affrontare le difficili sfide che il futuro ci pone.

Forse un altro modo per cambiare le cose ci sarebbe: un argomentato rapporto globale sulla sicurezza nel settore nucleare e nella gestione delle scorie, capace di dimostrare come il nucleare possa e debba giocare un ruolo principale nel futuro energetico mondiale, nel pieno rispetto della sicurezza per la popolazione mondiale.[221] Insomma, la fiducia del pubblico è indissolubilmente legata alla sicurezza nucleare. E la sicurezza nucleare non può essere meramente proclamata, ma deve essere dimostrata per ogni singola fase del ciclo nucleare, tradizionale o innovativo che sia.

Ma soprattutto resta fondamentale un maggiore impegno tanto a livello statale, quanto della comunità di scienziati, per creare una seria e solida cultura scientifica, in modo però che non vi sia una contrapposizione (come quella attuale), ma una complementarità tra cultura umanistica e cultura scientifica.[222] D'altra parte, oggi l'umanità non si troverebbe al grado di sviluppo in cui è senza l'apporto di entrambe, che, in modi diversi e con mezzi diversi, hanno contribuito a migliorare le condizioni di vita – intellettuali e materiali – dell'uomo e, con uguali colpe, a rendergli contemporaneamente difficile l'arte di convivere con i suoi simili, con la natura e con le sue stesse invenzioni.

5.2 – Perché finanziare la ricerca pura?

Oggigiorno la scienza di base, soprattutto a livello sperimentale, per progredire ha bisogno di finanziamenti sempre più elevati: è finito il tempo in cui i progressi e le rivoluzioni scientifiche potevano avvenire attraverso esperimenti condotti in una stanzetta, con materiale di recupero. Adesso la ricerca è costretta, per necessità, a richiedere l'utilizzo di ingenti risorse e di macchinari complessi,

---

[220] Cfr.: Rubbia C., *Energia: un "male" necessario?,* Dieci Nobel per il futuro, Edizione 1996. Sito Internet: http://www.smau.it/nobel/ita/bio/f_rubbia.htm

[221] Questo Rapporto globale è stato proposto dal Direttore Generale della IAEA, e in effetti esistono già dei primi passi in tale direzione, come per esempio il Nuclear Safety Review della IAEA. Cfr.: ElBaradei M., *The Future of Nuclear Power: Looking Ahead*, Address at the Japan Atomic Industrial Forum, April 1999. Sito Internet: http://www.iaea.org/worldatom/inforesource/dgspeeches/elbaradei/ ebsp1999n005.html

[222] L'importanza di una duplice cultura, scientifica ed umanistica, è oggetto di attenzione sempre maggiore nel mondo della scienza. Numerosi sono gli interventi dedicati a questo argomento, tra essi si cfr.: Regge T., *Cari colleghi, diamoci da fare*, in "Le scienze", n.373, settembre 1999, pp. 5. E cfr.: De Santis S., *Scienza e media: il gran rifiuto*, in "21mo secolo. Scienza e tecnologia", n.1, marzo 2000, pp.27-31.

con tecnologie portate agli estremi e l'intervento di numerose persone: non esiste quasi più il singolo scienziato che fa la scoperta del secolo, ora invece c'è quasi sempre un lavoro di *équipe* alla base di ogni nuova conoscenza.

Perché capita tutto questo? La spiegazione è semplice: le leggi fondamentali del mondo che tocchiamo e vediamo quotidianamente sono state scoperte; ma ora vogliamo sapere quello che c'è al di là della nostra esperienza di ogni giorno, e per farlo dobbiamo arrivare ai limiti. Ecco perché c'è bisogno di strutture sempre più avanzate e costose.

Ma proprio qui sorge il problema: a che serve? È questa una delle domande che vengono più frequentemente poste a chi della ricerca pura ha fatto la propria vita. Ebbene, al contrario di ciò che si pensa, sono numerosi i benefici – intellettuali e materiali – che derivano dagli avanzamenti nel sapere scientifico avanzato.

5.2.1 – La cultura

Prima di tutto la scienza moderna permette un'apertura mentale senza precedenti. Il microcosmo (fisica delle particelle) ed il macrocosmo (astrofisica) si fondono quando portati ai limiti: si pensi al recentissimo annuncio, fatto dal CERN, riguardo alla creazione di un "nuovo" stato della materia, dove i *quark* sussistono isolatamente, ebbene si pensa che l'universo, nei suoi primissimi istanti di vita (siamo ad un tempo di circa in milionesimo di secondo dalla sua nascita) si trovasse proprio in quello stato fisico. Ma non ci sono solo aspetti interdisciplinari, c'è di più.

Gli avanzamenti nella conoscenza scientifica ci permettono di capire come l'umanità in realtà sappia ben poco del mondo che lo circonda: sì, certo sappiamo come sono organizzate la materia e la natura alla scala di grandezza che l'uomo può osservare ad occhio nudo (tra il millimetro ed il chilometro), ma ben poca cosa è la nostra comprensione degli eventi a scale diverse (si pensi ai 10^{-16} metri dei *quark* o ai 10^{26} metri d'estensione dell'universo conosciuto). Infine, la globalizzazione del mondo scientifico ci dimostra come sia realmente possibile la serena convivenza tra persone provenienti da culture, mentalità, religioni e nazionalità diverse, accomunate da un'unica passione: il desiderio di conoscere.

5.2.2 – Scoperte teoriche e ricadute economiche

In particolare vogliamo qui riferirci a quelle che sono state le grandi scoperte teoriche della scienza, le quali, a distanza di anni ed in modo talvolta totalmente inaspettato hanno trovato larghe applicazioni pratiche e commerciali.

Per esempio: i circuiti elettronici sono stati creati negli anni Trenta da fisici che dovevano trovare il modo di contare le particelle nucleari, i *transistor* sono stati inventati da scienziati che si occupavano di teoria quantistica dei solidi, tutta l'industria elettrica deriva dalle scoperte di Thomson e Lorentz degli elettroni e del loro comportamento, le bobine di induzione dei motori delle macchine non potrebbero esserci senza le leggi d'induzione trovate da Faraday decine di anni prima, l'energia nucleare non esisterebbe se gli scienziati non avessero voluto indagare il comportamento dei nuclei atomici, i sistemi di navigazione satellitare (i GPS) che stanno ora diventando tanto conosciuti e che si basano su orologi atomici derivano da ricerche fatte per verificare unicamente la teoria della relatività generale di Einstein, e così via.[223]

Dunque ognuna di queste scoperte teoriche fondamentali ha portato a delle applicazioni con fortissime ricadute economiche, seppur completamente inimmaginabili per chi le compì e seppur dopo un lungo intervallo di tempo. Ma numerose sono anche le volte in cui la distanza tra la scoperta ed il suo sfruttamento pratico è stata di molto inferiore.

5.2.3 – *Spin-off* nell'industria

Centinaia sono stati i casi in cui delle tecnologie sviluppate per la ricerca pura hanno trovato larghe applicazioni nell'industria in tempi relativamente brevi. Ne diamo qualche esempio partendo dagli strumenti usati dalla scienza di base:

- acceleratori: industria dei semiconduttori, sterilizzazione (per cibo e in medicina), bruciamento delle scorie radioattive e generazione d'energia (*Energy Amplifier),* adroterapia (l'utilizzo di acceleratori di ioni e protoni per la cura del cancro è allo studio in varie parti del mondo, tra cui anche al CERN, dove vengono trasferiti i propri *know-how* al mondo sanitario attraverso il *Proton-Ion Medical Study.* Per capirne l'importanza basti pensare che è stato stimato che almeno una persona su otto, nel mondo occidentale, viene curata con un acceleratore e il giro di affari dell'industria degli impianti di radioterapia, basati sugli acceleratori nucleari, è di oltre 1.000 milioni di dollari all'anno[224]);
- rivelatori di particelle: rivelatori di cristalli (utili in medicina, per la sicurezza e per i test non distruttivi), camere a più filamenti (per le ispezioni nei container);
- informatica: *World Wide Web*, simulazioni al computer, diagnostica, sistemi di controllo;
- e ancora: criogenia, vuoto, ingegneria elettrica, ecc.

Due studi[225] hanno cercato di calcolare "l'utilità economica" di alcuni centri di ricerca nei confronti delle imprese che collaborano. L'utilità economica è definita come:

Utilità economica = aumento del fatturato + risparmio sui costi

[223] Per altri esempi, cfr.: Llewellyn Smith C. H., *What's the use of basic science*. Sito Internet: http://www.cern.ch/Public/DI/useofbasicscience/usebasescience.htm

[224] Cfr.: Anonimo, *Spin-offs in our daily life*. Sito Internet: http://www.cern.ch/Public/ TECHNOLOGY/dailylife.html

[225] Cfr.: Schmied et al., *CERN yellow report,* CERN/75-6 e Bianchi-Streit, M., *CERN yellow report*, CERN/84-14, citati in Llewellyn Smith C. H., *What's the use of basic science*. Sito Internet: http://www.cern.ch/Public/DI/useofbasicscience/usebasescience.htm

Nei riguardi del CERN, l'utilità economica dei contratti stilati con imprese di alta tecnologia risultava pari a 3, cioè ogni ECU pagato dal CERN generava un utile di 3ECU all'impresa. Lo stesso capitava per l'ESA (*European Space Agency),* che aveva un'utilità pari a 3,2.

Questa dunque è la dimostrazione che la ricerca scientifica serve anche a livello economico e non solo educativo.

5.2.4 – Finanziamenti alla ricerca nei paesi OCSE

Da quanto detto finora si evince come la scienza pura possa essere, a medio e lungo termine, un investimento molto remunerativo; ma è proprio in questo lungo intervallo di tempo che si nascondono le maggiori difficoltà per il reperimento di fondi.

Infatti, come ben sappiamo, l'economia privata è orientata verso il breve periodo, dove i profitti sono tangibili nel giro di pochi anni. Ecco perché la ricerca deve essere considerata a tutti gli effetti un bene pubblico e come tale va trattata. L'industria privata subentrerà poi nella ricerca applicata, ma quella pura è esclusivo appannaggio governativo. Ma qui può crearsi un'altra difficoltà, poiché il dipendere dallo Stato può talvolta limitarla, a causa del rischio di un'eccessiva burocratizzazione del mondo scientifico e di un'ingerenza troppo forte da parte dei poteri pubblici. Questo potrebbe portare ad uno stallo o comunque ad un rallentamento nelle scoperte e nel progresso scientifico, poiché, come disse Einstein, "la ricerca è una pianticella che per crescere rigogliosa e forte ha bisogno di un solo alimento: la libertà".

Tab. 48 – Finanziamenti alla R&S in Europa nel 1995 (in percentuale del PIL).

Paese	Industria	Governo	Università	Totale Stato
Belgio	1,09	0,06	0,44	0,50
Francia	1,44	0,49	0,38	0,87
Germania	1,51	0,34	0,43	0,77
Italia	0,56	0,22	0,26	0,48
Olanda	1,09	-	-	-
Regno Unito	1,35	0,30	0,30	0,60
Spagna	0,37	0,17	0,25	0,42
Media	1,06	0,26	0,34	0,71

Fonte: Eurostat, New Cronos Database.

Dai dati riportati in tabella si può facilmente notare come, a livello europeo, l'Italia sia uno dei paesi che investe di meno nella R&S. E questo ci porta purtroppo a riflettere su quella che sembra essere una caratteristica congenita del nostro paese: la discordanza tra parole e fatti. L'enfasi con cui si parla della ricerca scientifica (come strumento per affrontare e vincere le grandi sfide dell'ambiente, dell'occupazione, dello sviluppo e dell'energia) non è però accompagnata da altrettanta disponibilità nel deferimento di fondi. Tale *modus operandi* ha creato una serie di risultati negativi, i cui effetti più

vistosi sono "la fuga di cervelli all'estero, basso numero di ricercatori e di brevetti, scarsa partecipazione del settore privato, difficoltà nell'ottimizzazione delle già esigue risorse, ecc.".[226]
Eppure, anche in Italia come all'estero, un settore scientifico che, a livello nazionale, riceve parecchio sostegno c'è.

5.3 – La R&S nel settore energetico e in particolare nucleare

È cosa nota che in campo energetico, ma non solo in esso, una politica di ricerca scientifica e tecnologica – in senso favorevole all'ambiente – diventa sempre più una necessità strategica ed urgente. Ora, come dice l'on. Colombo, se "molti paesi si sono resi pienamente conto di queste priorità e agiscono di conseguenza, in altri paesi (fra cui, mi dispiace dirlo, l'Italia), alle affermazioni più o meno rituali di consenso non fanno seguito azioni adeguate. La questione è difficile, perché ciò che si richiede è uno sforzo senza precedenti di innovazione, non solo scientifico-tecnologica, ma anche economica e politico-istituzionale, per il quale occorre una volontà ampiamente condivisa".[227]
E come purtroppo ben sanno i ricercatori scientifici, questa volontà, in Italia, è assai poco condivisa.

Tab. 49 – Spesa per R&S energetica nel 1998 in milioni di US$.

	COUNTRY								
FLOW	**Austria**	**Belgium**	**Denmark**	**France**	**Germany**	**Italy**	**Spain**	**UK**	**USA**
Total conservation	7,60	0,00	9,01	6,73	15,41	52,13	3,61	1,61	421,29
Total oil & gas	0,27	0,00	2,09	32,04	0,00	0,00	0,00	5,58	73,14
Total coal	0,38	0,00	0,05	5,26	1,31	0,00	3,51	3,43	104,38
Total fossil fuels	0,66	0,00	2,14	37,29	1,31	0,00	3,51	9,01	177,52
Total Solar	3,95	0,00	3,85	1,64	51,05	20,16	9,71	1,99	85,91
Total Hydro	0,84	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,25	0,73
Total renewables	10,92	0,00	19,73	4,24	84,37	35,02	14,06	6,04	244,70
Nuclear LWR	0,00	25,93	0,00	121,21	28,65	8,64	0,00	0,00	0,00
Other converter reactors	0,00	0,00	0,00	3,73	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Nuclear fuel cycle	0,00	4,48	0,00	241,06	11,14	17,28	0,00	0,00	0,00
Nuclear supporting tech.	0,00	8,16	2,99	132,06	0,00	8,64	16,06	3,31	20,00
Nuclear Breeder	0,00	0,00	0,00	13,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Total nuclear fission	0,00	38,57	2,99	511,10	39,80	34,56	16,06	3,31	20,00
Nuclear fusion	2,64	5,46	1,88	33,40	135,99	73,73	14,73	21,52	217,29
Total nuclear	2,64	44,03	4,87	544,50	175,78	142,85	30,79	24,83	237,29
Total power/storage	4,63	0,00	4,44	0,00	27,35	16,13	0,34	2,15	126,29
Total other research	3,98	0,00	7,05	0,00	10,35	36,12	13,22	29,87	817,50
Total energy R&D	30,44	0,00	47,22	592,76	314,55	247,70	65,53	73,51	2.024,60

Note.: spese a prezzi e cambi del 1998; l'Olanda non è riportata poiché non ha fornito i dati
Fonte: nostra elaborazione sul *database* statistico della NEA.

---

[226] Cfr.: Anonimo, *L'intervento del Ministro della Ricerca Scientifica Ortensio Zecchino*, in Salvi L. A. (a cura di), *Conferenza nazionale energia e ambiente*, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 – XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999.
[227] Cfr.: Anonimo, Seguito dell'indagine conoscitiva sulle organizzazioni internazionali con particolare riferimento al ruolo e alla presenza dell'Italia: audizione del Direttore generale del centro europeo per la ricerca nucleare (CERN), http://www.senato.it/notes/ODG_PUBL/ 1dae6.htm

In ogni caso, quasi tutto il mondo occidentale sembra essersi reso conto che l'unica vera soluzione al problema ambientale – e non solo – viene da un maggior impegno della ricerca nel settore energetico, tale per cui ci si deve concentrare sui processi di produzione (puliti), sulle tecnologie usate (sicure) e sui materiali impiegati, in modo da differenziare le fonti. In effetti, bisogna ammettere che a livello europeo (tab. 49), i finanziamenti dati vengono sfruttati quasi per ogni campo della ricerca energetica.

Eppure le differenze ci sono. Per esempio, se si fa un confronto tra i maggiori paesi europei stupisce come l'Italia e la Germania non abbiano praticamente alcuna R&S riguardante le fonti fossili rispetto ai notevoli finanziamenti che sono loro destinati in Francia. Ma proprio in quest'ultima nazione e nel Regno Unito troviamo il più basso livello di impegno sulle rinnovabili, mentre esse vengono viste con buone speranze in Spagna e Danimarca e, ancor di più, dai governi italiani e tedeschi. Per quanto riguarda il nucleare, vediamo che in assoluto il paese che vi destina più risorse è, logicamente, la Francia; ma è interessante notare come in Germania, Italia e Gran Bretagna si speri molto in eventuali risultati (si ricordi che è opinione diffusa tra gli scienziati che si parli di almeno una cinquantina d'anni) delle ricerche sulla fusione nucleare, sebbene l'entusiasmo nei suoi riguardi stia costantemente scemando.[228]

Dunque, vista la situazione attuale e la prevista situazione futura del settore energetico e da quanto finora illustrato, appare chiaro che il nucleare si porrà come una "scelta obbligata" nell'avvenire della generazione elettrica, ma ciò dovrà accadere nel pieno rispetto delle norme ambientali e di sicurezza. Per tale motivo risulta indispensabile, da parte dell'intero settore nucleare, portare avanti la ricerca scientifica, onde sviluppare tecnologie che rendano accettabile per tutti questa forma di energia.

Giova qui ribadire come le ricerche in questo settore abbiano delle tempistiche piuttosto lunghe e delle notevoli difficoltà che si incontrano nel reperire i finanziamenti necessari, i quali risultano enormi proprio a causa del tempo richiesto per ottenere risultati sfruttabili commercialmente.

A questo riguardo diventa difficile non citare la proposta provocatoria di Charpak: "Sarebbe opportuno che […] gli operatori delle centrali nucleari fossero indotti a versare un'imposta consistente per kWh (del 5% per ipotesi) destinata alla ricerca. Quel patrimonio potrebbe servire a finanziare scelte più costose a breve termine, che [però] potrebbero rivelarsi indispensabili in un futuro remoto".[229] Dunque l'unico modo per non trovarsi impreparati di fronte ai problemi di domani è iniziare, già da oggi, a trovare le risposte; e ciò significa sostenere attivamente la ricerca scientifica e tecnica.

---

228 Cfr.: Bignami L. (a cura di), *Dossier. Quale energia?*, in "Focus", n. 90, aprile 2000, pp. 180-188.
229 Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

È altresì opportuno notare come, nel caso particolare dell'energia nucleare, le attività di R&S possano anche portare ad un miglioramento nel suo rapporto con l'opinione pubblica, tradizionalmente sfavorevole ad essa. Infatti, l'unica possibilità per la sopravvivenza del nucleare, con buona pace di tutti, è di sviluppare nuovi metodi di sfruttamento che siano intrinsecamente sicuri. Ed è proprio in questo senso che la proposta di Rubbia e del suo gruppo diventa interessante, soprattutto qualora si tenga conto che essa si prospetta anche conveniente dal punto di vista economico, poiché – come già detto – il costo dell'energia prodotta dall'*Energy Amplifier* sarebbe pari a tre quarti di quello del carbone e alla metà di quello del gas naturale, in tal modo il costo dell'elettricità sarebbe pari a circa la metà di quella derivante da altre fonti.[230]

Ora, se ipotizziamo per assurdo che l'energia nucleare convenzionale debba coprire l'intera produzione di elettricità, e tenendo conto dell'attuale sviluppo economico di Cina e India, si dovrebbe passare dai 434 reattori contemporanei a circa 2.000, ma in questo modo le riserve di uranio si esaurirebbero in una decina d'anni. Dunque, allo stato attuale della ricerca, l'unico mezzo per permettere la fornitura continua di elettricità dal nucleare sarebbe l'utilizzo dei reattori autofertilizzanti, che permettono di usare sia l'uranio 238, che costituisce il 99,3% dell'uranio naturale, sia il torio 232 naturale, che è ben tre volte più abbondante dell'uranio.[231]

Eppure, anche questi reattori autofertilizzanti, che, secondo quanto indicato da Charpak, permetterebbero di moltiplicare per oltre 50 volte le risorse energetiche dell'uranio naturale, appartengono ancora al mondo della ricerca e con esso spartiscono il duro compito di trovare finanziamenti e di venire accettati dall'opinione pubblica.

Si può già oggi prevedere che i reattori della prossima generazione saranno caratterizzati da una minore potenza, onde essere più vicini allo stato di sicurezza intrinseca. Non solo, se l'idea di Rubbia riuscirà ad essere portata avanti, essa permetterà di avere reattori in cui è impossibile che si generi una reazione a catena incontrollata, e dunque si avranno centrali ancora più sicure. Ma perché si arrivi allo stadio industriale, la ricerca dovrà dimostrare che queste nuove tecnologie, a parità di sicurezza, sono più economiche delle attuali. Ma come può la ricerca arrivare a tanto se non la si finanzia? Se, per darle i fondi necessari, le si richiedono in anticipo le conclusioni che da essa si vogliono trarre?

---

[230] Riguardo alle stime sui costi del kW/h prodotto dall'EA si confrontino il cap.3, par. 3.6.5, e cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999, e Fernàndez R., Mandrillon P., Rubbia C., Rubio J.A., *A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier*, CERN/LHC/96-01 (EET), CERN, Geneva 1996.

[231] Cfr.: Charpak G., Garwin R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

5.4 – R&S ed *Energy Amplifier*: fondi comunitari o privati?

Anche l'*Energy Amplifier*, come ogni altro progetto nucleare innovativo, si scontra con la difficoltà di ottenere i fondi necessari a portare avanti le attività di R&S. I finanziamenti richiesti sono elevatissimi, a causa degli inevitabili – e, giustamente, irrinunciabili – requisiti di sicurezza ed affidabilità che devono essere soddisfatti ed a causa della necessità di creare prototipi dimostrativi in scala reale, per dimostrare la loro valenza scientifica ed economica.

Ma non solo. Se si analizzano in modo esaustivo le varie relazioni sull'EA da parte di organizzazioni ufficiali, si noterà che l'unico punto non sottoposto a discussioni è quello del suo utilizzo come inceneritore di scorie. Ora, viene spontaneo chiedersi quali siano le ragioni sottostanti a tale unanimità di consensi solo su questo specifico aspetto, anche perché le modifiche tecniche richieste per il suo uso come produttore di elettricità o bruciatore sono piuttosto lievi.

Dunque, la risposta più immediata è che ci siano numerosi interessi economici per i quali un *Energy Amplifier* che brucia i residui radioattivi serve a migliorare la propria immagine e competitività, senza esserne minacciati. In effetti, l'industria nucleare convenzionale si trova proprio in questa posizione, anche perché, come si ricorderà, gli attuali reattori europei arriveranno al termine del proprio ciclo di vita solo attorno al 2020 e per allora avranno prodotto una notevole quantità di scorie. Dunque una macchina che permetta loro di eliminare, in tutti i sensi, uno dei loro principali difetti agli occhi dell'opinione pubblica è certamente una prospettiva interessante, ma solo e soltanto finché non entra in competizione come generatore d'energia.

5.4.1 – Il rapporto Pooley

Lo stesso tipo di riflessioni si solleva nell'analizzare il "Rapporto Pooley" (1996) della Commissione Europea sull'*Energy Amplifier*: ne vengono messi in luce solo aspetti positivi (guarda caso solo quelli che riguardano il suo utilizzo come bruciatore di scorie associato ai PWR), mentre viene rapidamente liquidato come nuovo metodo per produrre energia, a causa delle "ancora troppe" incognite tecniche, ma con l'invito di continuare la ricerca.

Soprattutto la prima parte di questo rapporto è fortemente polemica nei confronti dell'EA, riguardo al quale si afferma che:

- sono ancora troppi i rischi tecnologici e commerciali per affrontarli tutti in una volta sola, onde sviluppare un sistema competitivo per generare elettricità;
- necessiterebbe di soluzioni ingegneristiche più complesse e costose dei nuovi reattori PWR in fase di studio;
- non sarebbe visto con maggiore fiducia da parte di un'opinione pubblica avversa al nucleare;

- più che in sostituzione all'attuale tecnologia nucleare, l'EA è interessante per il suo miglioramento;
- bisognerebbe portare avanti la ricerca attraverso la costruzione di un prototipo in scala ridotta per l'incenerimento delle scorie, in modo da identificarne e risolverne eventuali problemi e verificarne l'utilità effettiva;
- in caso di successo, allora l'*Energy Amplifier* potrebbe essere utilizzato come bruciatore di scorie e poi, in un secondo tempo, come generatore di energia elettrica;
- infine, la ricerca ancora necessaria deve essere finanziata sì dalla Commissione Europea, ma si deve anche cercare di far intervenire l'industria privata.[232]

In effetti, quest'ultimo punto rispecchia la reale e difficile situazione in cui versa la R&S di ogni tipo e livello. Se in passato il problema veniva, parzialmente, risolto grazie a fondi pubblici e internazionali, oggi invece la situazione è più critica. Infatti, come è stato fatto notare alla Conferenza Nazionale sul nucleare, "il fatto che da qualche anno gli operatori pubblici tendano ad appoggiarsi all'industria privata, per finanziare i settori tecnologici di punta, solleva serie preoccupazioni per il futuro dei progetti di sviluppo più costosi e prolungati, suscettibili di produrre effetti economici solo a lungo termine".[233]

5.4.2 – La LAESA

Per fortuna però non tutta l'industria privata ha paura di impegnarsi in una ricerca che non prospetta alcun ritorno economico entro il breve periodo.

A marzo del 1997 è stata creata in Spagna, a Saragoza, la LAESA (*Laboratorio del Amplificador de Energia de Saragoza*), un consorzio industriale privato per lo sfruttamento industriale dell'EA, il cui azionariato vede tanto imprese private, quanto istituzioni pubbliche finanziarie, sia spagnole sia estere.[234] La posizione di questo consorzio all'interno della comunità di ricerca sui sistemi ADS è giustificata dal possesso di due brevetti: uno per *L'EA come produttore di energia* (con carattere esclusivo e mondiale) e l'altro per la *Trasmutazione degli elementi per attivazione neutronica risonante*.[235] E uno dei suoi obiettivi a lungo termine è la commercializzazione di questo sistema.

---

[232] Cfr.: Pooley D., STC Chairman, *Opinion of the Scientific and Technical Committee (STC) on a nuclear energy amplifier*, European Commission nuclear science and technology. Sito Internet: http://itumagill.fzk.de/ADS/ pooley.html

[233] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

[234] Imprese private: ABENGOA, TAIM- TFG, NOVOTEC, INGESGROUP, TECHNICATOME, ecc. Gruppi impresari: CREA, CEZ, CEPYME. Istituzioni finanziarie: IBERCAJA e Caja de Ahorros de la Immaculada. Istituzioni pubbliche: CIEMAT, IAF, CRS4, ACEGAS, ecc. Per maggiori informazioni consultare il sito Internet: http://laesa.com/laesainfo.html

[235] Primo brevetto, n.: PCT/EP94/02467. Secondo brevetto, n.: PCT/EP97/03218. Cfr. sito Internet: http://laesa.com/laesainfo.html

Infatti, la LAESA completato il preprogetto del Prototipo (con soluzioni molto diverse da quelle del gruppo di Rubbia) nell'agosto del 1998, ha stabilito un piano strategico in quattro fasi per dare dimensione industriale a questo concetto.

Prima fase: a partire dal 1999 costruzione degli elementi di base di un laboratorio destinato a sviluppare i componenti e le tecniche necessarie alla verifica tecnologica della trasmutazione di residui radioattivi. Ciò implica la costruzione di un acceleratore di protoni e di un bersaglio di spallazione. (Si noti che l'acceleratore sarà utile anche per ricerche di carattere medico, scientifico e tecnologico).

Seconda fase: avviamento dell'acceleratore e del bersaglio di spallazione. Contemporaneamente, con l'appoggio di un possibile programma europeo, studi di ampliamento del laboratorio per costruire un dimostratore, di potenza ridotta rispetto al prototipo, con una potenza tra 1 e 10 MW. Questo dovrebbe permettere di affrontare, in un unico sito, tappe ben precise del suo futuro sviluppo industriale. In modo da verificarne la validità tecnologica ed economica.

Terza fase: partecipazione alla costruzione e all'avviamento del prototipo europeo.

Quarta fase: partecipazione alla preparazione della fase industriale dell'*Energy Amplifier*.[236]

Il preprogetto di un prototipo di EA (il cd. PAE) permetterebbe di disporre di un impianto pilota tale da verificare tutte le tecnologie necessarie ad un EA. Inoltre aumentando, in un secondo momento, la reattività del sistema pur mantenendolo a livello sottocritico e aumentando anche l'intensità del fascio di protoni si potrebbe arrivare ad una potenza di 250 MW. Si avrebbe così di un impianto di dimostrazione che potrebbe essere utilizzato come reattore commerciale tramite l'aggiunta di un normale sistema di generazione di energia elettrica dall'energia termica.[237]

Bisogna però dire che negli ultimi tempi l'attività della LAESA è stata bloccata da un referendum popolare che ha votato contro l'installazione di un qualsivoglia tipo di impianto nucleare in quella zona, e dunque le positive premesse di cui essa sembrava l'anticipazione sono state deluse. In ogni caso resta però fondamentale una collaborazione a livello europeo, che sta forse iniziando, per passare alla fase del prototipo in scala reale.

5.4.3 – Prime collaborazioni a livello interstatale: il Technical Working Group

Nell'autunno del 1998 i ministri della ricerca di Francia, Spagna e Italia hanno deciso di creare un gruppo di consulenti per definire un programma europeo di R&S comune sugli ADS. Gli obiettivi su cui ci si vuole concentrare sono:

- potenzialità: dagli studi condotti, gli ADS sembrano possedere notevoli facoltà per la trasmutazione delle scorie a lunga vita;

---

[236] Cfr.: Siti Internet: http://www.laesa.com/laesainfo.html e http://www.laesa.com/ampli.html
[237] Cfr.: Anonimo, *El Amplificador de Energìa.* Sito Internet: http://www.laesa.com/ampli.html

- prototipo: la costruzione di un impianto dimostrativo (nel giro di una decina d'anni) con una potenza significativa, in modo da sviluppare le tecnologie industriali necessarie ad un eventuale sfruttamento commerciale del sistema;
- sforzi comuni: un'azione combinata e coordinata da parte dei vari dipartimenti governativi di ricerca e delle società industriali, con risorse umane e finanziarie *ad hoc*;
- supporto e collaborazione dell'EU: visto che la grandezza del prototipo sarebbe quella di un impianto regionale, la collaborazione europea è cruciale, quindi bisognerebbe immediatamente suscitare: l'interesse di altri *partner* europei al progetto, il supporto dell'EU all'interno del Quinto Programma Quadro, la collaborazione con gli USA (dove si sta seguendo una ricerca affine) e con la Russia (dove esiste un importante *know-how* sulla tecnologia dei refrigeranti al piombo);
- piattaforma industriale ad hoc: come presupposto necessario per un'azione intergovernativa, dovrebbe essere creata una piattaforma industriale appropriata.

Il progetto dimostrativo europeo dovrebbe avere una durata di circa 10 anni ed essere diviso in tre fasi: la creazione di una *partnership* europea (sia livello di centri di ricerca che a livello industriale), l'adempimento dei programmi di R&S (che porti al progetto finale dell'impianto dimostrativo) e la costruzione e la messa in funzione dell'impianto dimostrativo. Inoltre il TWG ha indicato alcune delle questioni che devono ancora essere sottoposte ad un'approfondita ricerca sperimentale: le tecnologie per l'acceleratore, la finestra del bersaglio, il metallo liquido, i test sui materiali, il ciclo del combustibile, la sicurezza e l'ottenibilità di permessi per il sito.
Infine, il TWG dovrebbe dare una stima del costo della ricerca e del prototipo, in ogni caso il tasso di spesa iniziale previsto per il 1999 era stato indicato in circa 10 milioni di ECU a nazione.[238]

5.4.4 – Primi passi a livello comunitario: il rapporto dello STOA

Come abbiamo già visto, dalla Commissione Europea, l'*Energy Amplifier* viene principalmente visto come metodo di smaltimento definitivo delle scorie, più che come alternativo mezzo di produzione di elettricità, in base alla competitività e disponibilità delle altre fonti almeno fino al 2020 circa. Resta comunque sottinteso che, poiché allo stato attuale delle cose l'EA è un progetto in fase terminale di definizione, prima che esso venga completato, che ne sia costruito un primo dimostratore ed un successivo prototipo in scala reale, si arriverà a poterlo immettere commercialmente sul mercato in una data di pochi anni anteriore al 2020 – quando gli attuali reattori saranno arrivati al termine della loro vita utile – e probabilmente per allora esso si dimostrerà competitivo a tutti gli effetti.

---

[238] Cfr.: Rubbia C. et al., *Interim report of the Technical Working Group on accelerator driven sub-critical system,* CERN, Geneva October 1998, (per gentile concessione del CERN).

In ogni caso nell'ambito europeo, l'EA viene ultimamente visto con maggiore ottimismo rispetto a quanto capitava nel rapporto Pooley e sembra che esista la seria intenzione di dare il via ad un impianto di dimostrazione, il cui costo totale è indicato attorno ai 1.000 milioni di EURO, con costi annui tra i 140 e i 200 MEURO su un periodo di 5-7 anni (costi di molto inferiori a quelli richiesti dai progetti di fusione nucleare).[239] Questo dimostratore potrebbe essere realizzato o direttamente sotto l'egida dell'UE o da un'ampia collaborazione scientifica europea guidata o dalla Commissione Europea o da un'apposita struttura. In ogni caso i finanziamenti proverrebbero almeno in parte dall'UE.

In particolare, il rapporto dello STOA (*Scientific and Technological Options Assessment*) puntualizza come le componenti dell'EA siano tutte ben note dal punto di vista tecnico e molte di esse siano già anche in uso, ma viste le elevate *performance* richieste e il loro comportamento, sconosciuto, in un unico sistema, è necessaria ancora una ragionevole dose di R&S che può essere conclusa nel medio periodo. Infatti, alcuni esperimenti preliminari hanno dimostrato che l'idea è di per sé valida.[240]

In linea generale, comunque, l'EA è visto come una priorità proprio per le opportunità di bruciare le scorie e di ottenere radioisotopi, mentre la sua capacità di produrre energia passa in secondo piano tanto per la comunità scientifica quanto per i produttori di energia elettrica. In particolare, soprattutto questi ultimi ritengono che attualmente l'EA non risponda del tutto ai criteri dell'industria elettrica. [241]

Il punto fondamentale è che, ad oggi, esistono molte diverse opinioni sui costi dell'*Energy Amplifier,* non sempre concomitanti con quelle fornite dal gruppo del CERN.

Secondo uno studio del *Laboratoire d'Economie de l'Energie* di Grenoble, la versione termica dell'EA fa prevedere un prezzo per unità leggermente più alto di quello dei reattori nucleari francesi, ma molto più economico di quello di altre fonti di energia (carbone, metano francese, reattori nucleari tedeschi). Probabilmente, il caso della versione a neutroni veloci (quella proposta dal gruppo di Rubbia) sarebbe persino meno cara.

Per cui, sebbene al "normale" reattore debba essere aggiunto, con costi addizionali, un acceleratore, questi costi vengono compensati dal minor costo del combustibile (poiché non vi è alcuna separazione di isotopi) e dalla facilità di esercizio, con una manipolazione meno frequente delle barre di combustibile.[242]

---

[239] Cfr.: Husson J.P., de Montgolfier P., *A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study*, European Parliament, Directorate General for Research, the STOA (Scientific and Technological Option Assessment) Programme, Luxembourg June 1999.

[240] Si tratta in particolare del FEAT e del TARC, per informazioni precise si possono consultare i resoconti dagli esperimenti al sito Internet: http://www.cern.ch

[241] Cfr.: Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, op. cit.

[242] Cfr. Anonimo, The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand, CERN Courier, vol.35, n.3, May 1995, pag. 15-19.

In una rivalutazione dell'EA fatta dall'EURATOM-STC[243] di 1.410 MEURO per ogni unità dell'EA e dei costi addizionali di 500 MEURO (costi del proprietario più interessi durante la costruzione) si ottiene un costo totale d'investimento per unità pari a 1.910 MEURO, con un costo del kWh installato di circa 3.200 EURO. In tal caso, poiché un normale PWR produce energia a circa 2.450 EURO/kWh (attualizzato al 1999), l'EA non si dimostrerebbe competitivo per la produzione di elettricità. Mentre, nel caso di un suo uso specifico per lo smaltimento delle scorie e della sua costruzione *in situ* accoppiato al reattore PWR, l'energia sarebbe un sottoprodotto e dunque potrebbe essere venduta ad un costo marginale, il che è una prospettiva economicamente attraente. [244]

In generale, dunque, l'opinione è che l'EA abbia il costo di un normale reattore nucleare più il costo dell'acceleratore (che corrisponde a circa il 20% del costo del reattore). Ma, secondo gli esperti che lavorano al progetto, con l'utilizzo del piombo liquido come moderatore e come refrigerante e con ulteriori innovazioni ed aumenti di efficienza delle altre componenti, il costo del sistema – escluso l'acceleratore – potrebbe diminuire di un buon 20% (o anche più) permettendo così di integrare il costo dell'acceleratore e di rendere il costo totale dell'EA pari a quello di un normale PWR, ma con gli indiscutibili vantaggi di energia pulita e sicura che esso comporta.

In ogni caso, dall'inchiesta condotta dallo STOA sulla necessità o meno di costruire un dimostratore europeo per testare lo smaltimento delle scorie si nota come vi sia un supporto generalizzato a questa prospettiva. Inoltre, è opinione comune che, qualora il dimostratore dovesse avere successo, un prototipo in scala reale dell'EA potrebbe e dovrebbe essere realizzato a livello europeo. Ma, allo stesso tempo, si nota anche una qualche riluttanza da parte delle compagnie produttrici di elettricità e di smaltimento dei rifiuti a finanziare progetti che potrebbero rendere obsoleti i precedenti investimenti non ancora ammortizzati.

Sono ora in atto vari programmi di R&S sugli ADS e/o sull'EA, che vengono portati avanti da attori diversi:

- il gruppo del CERN, guidato dal Prof. Rubbia, che continua il suo lavoro pionieristico sugli aspetti più innovativi;
- una collaborazione tripartita, a livello statale, tra Italia, Francia e Spagna, che è iniziata nel 1998;
- l'incoraggiamento dei singoli stati europei verso la ricerca privata sulle problematiche dell'EA, attraverso varie organizzazioni, come la GEDEON francese, e aziende, come l'italiana ANSALDO e la LAESA spagnola;
- la Commissione Europea, che nell'ambito del quarto programma quadro ha finanziato nove programmi di ricerca su vari aspetti dell'EA, finanziandoli in complesso con 5-6 MEURO,

---

243 Citato in Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, op. cit.
244 Cfr.: Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, op. cit.

e che nel quinto programma quadro prevede la continuazione dei progetti non terminati e cinque nuove aree di ricerca, che si prevede che saranno finanziate con un totale di 40 MEURO.[245]

Anche dall'inchiesta dello STOA, dunque, si evince che l'opinione generale riguardo all'uso dell'*Energy Amplifier* per la produzione massiva di elettricità è piuttosto sfavorevole. Le ragioni apportate sono principalmente: la non competitività economica nel mercato dell'energia elettrica nel medio periodo, le incognite poste dal ciclo del torio che non è ancora molto ben conosciuto e infine la complessità del sistema nel suo insieme. Inoltre, entra qui in gioco un altro problema e cioè che le innovazioni dell'EA, in particolare gli intensi fasci di neutroni provenienti dall'acceleratore, potrebbero essere guardate con sospetto dalle autorità preposte alla sicurezza, le quali potrebbero domandare misure di sicurezza eccessive, con un conseguente aumento dei costi.[246] L'unica speranza è che le caratteristiche tecniche dell'EA vengano analizzate senza falsi allarmismi e senza cedere all'inconscia e umana paura di fronte alle novità.

Questa visione "restrittiva" è poi anche sostenuta dalle previsioni sulla domanda di energia elettrica in Europa, che fino al 2030-2050 continuerà ad essere soddisfatta da petrolio e soprattutto da metano (con un incremento di un fattore quattro), mentre le fonti rinnovabili si manterranno attorno al 5% e il nucleare al 12% del consumo totale di energia.[247] Quindi l'unica possibilità di un utilizzo "elettrico" dell'EA, in Europa, prima del 2050, sarebbe una crisi del mercato di gas e petrolio combinata con una visione più favorevole dell'opinione pubblica verso il nucleare.

Concludendo, dunque, è fortemente condivisa, anche dallo STOA e grazie all'enfasi posta da Rubbia su questo aspetto, l'opinione che l'*Energy Amplifier* possa e debba essere sfruttato come inceneritore di scorie. Pure in questo caso, le motivazioni apportate sono soprattutto che esso permetterebbe di risolvere i problemi di eliminazione delle scorie, dello smaltimento delle armi nucleari e del fatto che i costi dell'EA, mentre sono letali per i criteri del mercato energetico, sono invece accettabili per quelli della pubblica sicurezza. E proprio per questo, l'Europa non sembra voler rinunciare al ruolo di attore principale in un nuovo settore del mercato nucleare.

Infatti, attualmente esistono tre progetti definitivi per diversi dimostratori o prototipi in scala dell'EA:

- il dimostratore da 80 MW proposto dall'ANSALDO, in collaborazione col gruppo di Rubbia, non in scala reale;
- quello proposto dalla Framatome, anche non a scala reale;

[245] Cfr.: Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, op. cit.
[246] Cfr.: Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, op. cit.
[247] Si ricordi che la domanda di energia in ogni caso crescerà, mentre si prevede che le fonti rinnovabili ed il nucleare continueranno a fornire più o meno la stessa quantità di energia di adesso, dunque sarà il loro *share* nella generazione totale di energia che diminuirà, non la loro produzione effettiva.

– il prototipo in scala ridotta della LAESA.

5.5 - Conclusioni

Riassumendo, dunque, le principali motivazioni per la ricerca e lo sviluppo di nuove sorgenti di energia nucleare sono quelle di conciliare il vantaggio intrinseco di una fonte di energia così potente e quasi illimitata, con una nuova tecnologia che sia rassicurante ed accettabile da un punto di vista sociale ed ambientale.

Ed è proprio in tale senso che l'*Energy Amplifier* è stato concepito: come una nuova fonte di energia nucleare sicura, pulita e purificatrice. Inoltre, il concetto dell'EA come una serie di unità che producono energia nucleare ha svariati vantaggi:

una forte riduzione dei costi dovuta alla standardizzazione ed una maggiore competitività;

una maggior sicurezza rispetto al nucleare tradizionale;

la possibilità di usare *in loco* una parte del flusso di neutroni per incenerire le scorie più dannose e nel contempo di produrre energia.

Certo c'è ancora bisogno di molti studi per verificarne la fattibilità, ma soprattutto ora si è giunti al punto in cui si deve passare alla ricerca sperimentale, che è poi quella che richiede i maggiori finanziamenti. I costi aggiuntivi della ricerca negli organismi internazionali sono comprimibili, anche se non eliminabili, e per questo è utile sviluppare grandi installazioni attraverso una serie di istituti nazionali collegati internazionalmente, in modo da ridurre i costi e aumentarne l'efficacia.

Dunque, il progetto dell'EU per la R&S di un reattore assolutamente sicuro è la migliore risposta a coloro che ormai reagiscono in maniera irrazionale al solo sentir parlare di nucleare. Lo scopo è di creare un reattore tale che, nel caso in cui si sommassero tutti gli scenari catastrofici possibili, nulla potesse filtrare all'esterno delle strutture contenenti il reattore.[248] E l'*Energy Amplifier* è stato progettato proprio per eliminare il rischio di catastrofi nucleari e per garantire l'eliminazione delle scorie radioattive. Ma la questione fondamentale è che il tentativo di Rubbia di proseguire in Italia (che, grazie ai centri di Trieste e Frascati, possiede il necessario *know-how* nella tecnologia degli acceleratori) lo studio di fattibilità dell'EA abbia incontrato severe difficoltà, che solo oggi – dopo sette anni dal primo annuncio del progetto – sembrano iniziare a disciogliersi.

In effetti, qualche segnale positivo esiste perfino in Italia, come si intuisce dalle parole di Ugo Farinella, coordinatore della conferenza Energia e Ambiente (novembre 1998) organizzata dall'ENEA: "L'energia nucleare, da fissione e da fusione […], viene considerata nell'ambito dei temi

---

[248] Cfr.: Charpak, G., Garwin, R.L., *Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio*, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

di ricerca. L'opportunità di non chiudere per il futuro opzioni nucleari, eventualmente basate su soluzioni innovative, richiede di mantenere una capacità di ricerca e di valutazione autonoma a un livello sufficiente ad individuare, comprendere, valutare ed eventualmente sviluppare tali soluzioni".[249]

A questo punto diventa fondamentale procedere ad una dimostrazione del funzionamento e della sicurezza dell'*Energy Amplifier* nel suo complesso, in tutti i possibili regimi operativi e ad una scala sufficientemente ampia da divenire il precursore di un trasmutatore industriale di scorie e di un generatore commerciale di elettricità. Ma per realizzare questo progetto c'è bisogno di un serio sforzo economico e scientifico su base europea.

Ed il motivo fondamentale per sostenere tale sforzo è che visti gli accordi internazionale sulla protezione dell'ambiente, che implicano di diminuire il consumo delle fonti fossili, vista la tradizionale avversione dell'opinione pubblica al nucleare convenzionale, che non fa prevedere la costruzione di nuove centrali in Europa, e viste le domande attese di energia per il futuro, che tengono conto anche dello sviluppo dei paesi asiatici e che non potranno essere soddisfatte dalle fonti rinnovabili, ebbene visto tutto questo, non si può rischiare di arrivare impreparati al momento in cui i politici chiederanno la risposta a tali problemi. E gli unici che possono fornire le risposte – un giorno pretese – sono gli scienziati. Ma per poter lavorare hanno bisogno di fondi, di modo che possa proseguire la ricerca di una fonte energetica affidabile ed illimitata.

E l'*Energy Amplifier* è tutto questo. Permette di realizzare il sogno di reattore nucleare "pulito" che generi energia senza produrre scorie. Proprio in tale prospettiva merita di essere considerato: come una forma di energia nucleare socialmente accettabile e totalmente rinnovata, poiché, come dice il Prof. Rubbia: "l'innovazione è la più potente delle nostre risorse rinnovabili".[250]

---

[249] Citato in Salvetti, C., *Apertura dei lavori*, in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma20 novembre 1998, 21[mo] secolo, Milano 1999, pp. 49.
[250] In Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998. Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

APPENDICE

A.1 – Il funzionamento delle centrali nucleari tradizionali

Per poter comprendere le novità apportate dall'*Energy Amplifier* alla generazione di energia nucleare è necessario avere prima un'idea di quanto capita in una centrale tradizionale classica. I tipi di reattori nucleari più diffusi sono i PWR, cioè i *Pressurized Water Reactor* ovvero i reattori ad acqua pressurizzata, e i BWR, cioè *Boiling Water Reactor* ovvero i reattori ad acqua bollente, a seconda che l'acqua utilizzata per raffreddarli venga trasformata in vapore, attraverso l'ebollizione, o venga mantenuta alla stato liquido, attraverso la pressione.[251]

Ogni forma di energia prodotta dalla fissione nucleare è basata sulla tendenza di alcuni isotopi della famiglia degli attinidi (elementi con un numero atomico superiore a 89, come torio, uranio, plutonio) ad assorbire un neutrone termico (= lento) – è la cosiddetta cattura neutronica – e a scindersi in più atomi (fissione) liberando energia.

Ora, nelle centrali nucleari classiche si usano come combustibili degli isotopi di uranio (l'uranio 235) e di plutonio (il plutonio 239), che sono elementi fissili (cioè che decadono spontaneamente, emettendo un neutrone) e che dunque generano un processo di produzione di energia che si sostiene spontaneamente. Quando questi elementi sono usati in concentrazioni adeguate si produce un numero di neutroni di fissione capace di causare altre scissioni e così via, provocando così una reazione a catena. Il bilancio di questa reazione è dato dal fattore di criticità, k_{eff}[252], che quando è uguale ad uno è critico ed implica che la reazione è in grado di autosostenersi. In queste centrali si opera in condizioni vicine alla criticità (cioè con un k_{eff} prossimo a uno), per produrre energia senza instaurare una reazione a catena, cioè per impedire che il numero totale dei neutroni cresca all'infinito, il che porterebbe anche l'energia emessa a crescere all'infinito. Ma proprio di qui nascono i problemi.

Infatti, nel caso, per quanto improbabile, di un malfunzionamento dei sistemi di sicurezza e controllo, o di un errore umano, può nascere un processo a valanga, con eventuale esplosione atomica o fusione del nocciolo (come era successo a Chernobyl) e quindi conseguente nube radioattiva.[253]

Ma all'interno di un reattore nucleare si verifica anche un'altra reazione: la cattura neutronica. In pratica, alcuni dei neutroni emessi nella reazione di fissione vengono catturati da atomi di un qualsiasi elemento, che diventano così instabili e danno luogo alla classe più pericolosa di scorie radioattive: i cosiddetti transuranici, cioè elementi più pesanti dell'uranio che non esistono in natura.

L'altra parte delle scorie è invece costituita dai frammenti di fissione, che sono gli elementi derivati dalla frattura dell'atomo di uranio (o di plutonio) e che sono molto (circa ventimila volte) meno pericolosi dei transuranici. Il carico di combustibile spento di una centrale ha una radiotossicità di decine di miliardi di Sievert, quando la dose letale per un uomo è di circa 4,5 Sievert.

A.2 – Strategie gestionali nel settore nucleare odierno

Vista la situazione contingente, poco favorevole alla creazione di nuove centrali, è ovvio che i gestori di quelle già esistenti abbiano focalizzato il proprio impegno sul migliorare il più possibile i loro impianti, ottenendo ottimi risultati. Ciò è stato possibile grazie alla presenza di personale qualificato sia nel *management* che nel settore tecnico, alla programmazione e pianificazione minuziosa ed alla costante vigilanza delle operazioni.

---

[251] Cfr.: Buono S., *La pattumiera atomica*, Newton, n. 10, ottobre 1999, pp. 142-157.
[252] Si veda il glossario per una spiegazione più approfondita del fattore di criticità e delle sue implicazioni.
[253] Cfr.: Battiston R., *Il Nobel Rubbia fa il tifo per il torio*, in "TuttoScienze", inserto de "La Stampa", 1 dicembre 1993.

Così, si è normalmente arrivati a far coincidere gli arresti delle centrali (periodi di fermata) con la ricarica, la manutenzione, la sostituzione delle parti ed i controlli di sicurezza. Sono anche diminuite le fermate di emergenza, grazie alla politica di previdenza nel sostituire le parti più soggette a problemi in anticipo rispetto alla loro vita utile, e soprattutto ad evitare il più possibile l'esposizione del personale alla radioattività. Inoltre, sono stati migliorati i risultati di esercizio inizialmente previsti, permettendo così di diminuire la percentuale dei costi di investimento sui costi unitari di produzione di elettricità.
Sono poi attualmente in corso studi per aumentare la vita utile delle centrali, oltre i 40 anni inizialmente previsti, con tutti i vantaggi economici che ne deriverebbero. Infatti, si otterrebbe una maggiore efficienza nello sfruttamento del capitale precedentemente immobilizzato e, utilizzando l'impianto oltre la vita utile prevista, l'energia elettrica prodotta, dopo i 40 anni, avrebbe un costo di produzione estremamente basso. In base ad alcuni studi, sembra che la vita dei reattori dell'ultima generazione possa arrivare oltre i 60 anni.[254]
Mi si permetta però, di far notare che, per quanto perfettamente giustificabile dal punto di vista economico di breve periodo, il tentativo di prolungare la vita utile delle centrali rischia di creare seri problemi nel lungo termine, in quanto tende a "distrarre" la R&S dall'indagine su nuovi metodi di produzione di energia. In questo modo si consegue soltanto il risultato di rimandare la questione e di arrivare impreparati al momento in cui, tra 10 o 15 anni, ci sarà la necessità di disporre di *altri* mezzi di produzione dell'energia: se non vogliamo trovarci in questa situazione, dobbiamo iniziare sin d'ora ad esplorare nuovi metodi.
Infine, si è cercato di ridurre i tempi di costruzione delle centrali, senza però tralasciare gli *standard* di sicurezza, in modo da ridurre gli interessi passivi sul capitale immobilizzato, interessi che, come abbiamo già visto nella precedente tabella, sono tutt'altro che trascurabili. Così, grazie alla standardizzazione dei progetti e alla programmazione minuziosa, si è arrivati a costruire delle centrali da 1.000 MWe in circa cinque anni. Un'analoga riduzione dei tempi è stata conseguita anche nell'avviamento e nel raggiungimento della piena potenza degli impianti, essendo questo l'altro elemento che influisce sugli interessi passivi.

A.3 – Strategie per il nucleare di seconda generazione

Anche nel settore nucleare, come in ogni altra industria presente sul mercato e con prospettive di sviluppo, si guarda comunque ad una nuova generazione di impianti, compresi gli ADS e quindi l'*Energy Amplifier*. Dal punto di vista manageriale e strategico, si possono notare due tendenze principali: la concentrazione e la standardizzazione degli impianti.
Da una parte abbiamo infatti paesi come la Francia, la Germania, il Giappone e la Gran Bretagna, che hanno preferito costruire un esiguo numero di grandi centrali (ottenendo delle buone economie di scala) per assicurare la copertura di base, andando però incontro a rischi di affidabilità della rete in caso di fermate d'emergenza.
Dall'altra troviamo invece numerosi paesi che si stanno concentrando su impianti di taglia minore, che grazie ai minori costi di investimento, potrebbero risultare competitivi rispetto alle grandi centrali, con il vantaggio di non comportare seri problemi alla rete globale in caso di arresti temporanei. Resta però da vedere se, i piccoli reattori, siano in grado di competere con le altrettanto piccole centrali tradizionali a fonte fossile; comunque viste le attuali preoccupazioni ambientali e la crescente richiesta energetica dei PVS è possibile prevederne un futuro sviluppo.
Ma sicuramente, i maggiori vantaggi economici si possono trarre dalla standardizzazione (come è stato ipotizzato anche per l'EA) dei progetti e dalla conseguente costruzione in serie degli impianti, come dimostrato dalla strategia già in atto in Francia, Canada e Giappone. In effetti, la disponibilità

---

[254] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

di progetti *standard* permette di diminuire i costi, per ogni singola unità, e di ripartirli sull'intero parco nucleare. Si tratta soprattutto dei costi: di progettazione, di macchinari per la costruzione, di indagini di sicurezza, di ottenimento dei permessi, di problemi inattesi durante la costruzione, di fabbricazione e reperibilità delle componenti di ricambio.[255]

Un altro vantaggio è ottenibile dalla costruzione, in unico sito, di più centrali. Anche in questo caso è possibile ottenere notevoli riduzioni nei costi:

- per l'acquisizione e l'approvazione del sito, delle linee di trasmissione alla rete e degli impianti,
- per la manodopera (cui può essere assicurata una continuità di impegno, accrescendone anche la produttività)
- per installazioni e servizi, che in questo caso saranno in comune (strade, impianti di stoccaggio del combustibile, pezzi di ricambio, attività gestionali, amministrative, di manutenzione e di sicurezza).

A titolo di esempio, si possono citare Francia, Canada e Giappone, che, costruendo più reattori in uno stesso sito, hanno registrato diminuzioni dei costi suddetti di oltre il 20%.[256]

A.4 – Le centrali termoelettriche[257]

Nelle centrali termoelettriche con generatore a combustibile solido, liquido o gassoso, il motore che fa girare l'alternatore è costituito da una turbina che, è azionata dal vapore ad alta pressione.
Lo schema di una centrale termoelettrica è il seguente:

- un generatore di vapore (o più semplicemente una caldaia);
- una turbina ed un alternatore (turboalternatore);
- un condensatore.

Questo tipo di centrale comporta una serie di trasformazioni energetiche: l'energia termica del combustibile si trasforma in energia del vapore d'acqua (entalpia); l'entalpia si trasforma in energia cinetica (muovendo la turbina); l'energia della turbina si trasforma, attraverso l'alternatore in energia elettrica.
La potenza elettrica disponibile da un'unità termoelettrica di questo tipo si aggira sui 600MW naturalmente ciò avviene con una notevole spesa di energia che non si trasforma in lavoro utile, perché non tutta l'energia del vapore d'acqua è sfruttabile.
Questo tipo di centrale deve necessariamente essere localizzata in luoghi con abbondante disponibilità d'acqua (per il raffreddamento e la condensazione del vapore) e quindi in prossimità del mare o di un fiume e vicino ad un'importante via di comunicazione per il trasporto del combustibile.

L'impatto sull'ambiente è dovuto essenzialmente al riscaldamento localizzato dell'acqua di raffreddamento ed all'inquinamento atmosferico dovuto ai prodotti della combustione che sono quello che rimane del combustibile bruciato. I prodotti della combustione che vengono espulsi dal camino sono costituiti da polveri, ossidi di carbonio, ossidi di zolfo, ossidi di azoto.

A.5 – Le centrali turbogas

Le centrali turbogas sono impianti di produzione molto semplici e compatti. Esse sono costituite da un compressore, una camera di combustione e una turbina a gas. Il compressore invia aria compressa nella camera di combustione, dove l'aria fa da comburente per un combustibile che può

---

[255] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.
[256] Cfr.: Anonimo, *Presentazione,* in Spezia U. (a cura di), *Energia nucleare. Un futuro da salvare*, op. cit.
[257] Per la descrizione dei seguenti impianti ci si è basati sui dati in Vitagliano G., *Energia per tutti. Un'esposizione chiara per capire meglio l'energia*, 21[mo] Secolo, Milano 1998.

essere un gas (metano) o il gasolio. La miscela così formata viene inviata nella turbina facendola girare e trasmettendo il suo movimento all'alternatore ad essa collegato.
Il maggior pregio di questi impianti è quello della semplicità e rapidità con cui possono essere avviate, il tempo della messa in funzione è di soli pochi minuti, mentre per gli altri tipi di centrali è di ore o addirittura giorni. Lo svantaggio invece è che la potenza unitaria che sono in grado di fornire è abbastanza limitata (poco più di 120 MW) ed il loro rendimento è molto basso (20-25%) contro il 40% di una centrale termoelettrica e l'80% di un'idroelettrica.

A.6 – Gli impianti a ciclo combinato

Le centrali "a ciclo combinato" sono basate sugli impianti turbogas ai quali viene però aggiunto un gruppo a vapore di potenza analoga a quella del gruppo turbogas. Il gruppo a vapore ha il compito di recuperare in parte il calore residuo del gruppo turbogas mediante una caldaia, nella quale l'acqua viene preriscaldata dai fumi di scarico del turbogas. Questo sistema permette un notevole aumento del rendimento complessivo che arriva a sfiorare il 50% ed inoltre permette di creare dei gruppi (definiti "moduli") di potenza unitaria molto più elevata, fino a quasi 400MW elettrici, formati da due turbogas e un gruppo a vapore collegati tra loro.

A. 7 – Le centrali idroelettriche

Le centrali idroelettriche sono il tipo più semplice di centrale per la produzione di energia elettrica. In esse, l'acqua posizionata ad un livello più alto viene convogliata sulle pale della turbina idraulica provocando la rotazione di quest'ultima e quindi dell'alternatore che genera l'energia elettrica. Più in particolare, esse sono costituite da:

- un serbatoio d'acqua ad alta quota
- una condotta che porta l'acqua fino alla turbina
- organi di intercettazione (paratoie, valvole ecc.) superiormente ed inferiormente alla condotta
- organi di regolazione adatti a graduare la quantità d'acqua e quindi la potenza di funzionamento dell'impianto
- la turbina
- un bacino per la raccolta dell'acqua a bassa quota.

Per quanto concerne l'impatto ecologico dal punto di vista dell'inquinamento atmosferico è certamente il modo più pulito di produrre energia elettrica, ma il suo impatto con l'ambiente è notevole soprattutto per la presenza della diga. Il principale rischio infatti è rappresentato dalla possibilità di cedimento della diga, ipotesi che se pur remota non è impossibile come dimostrano alcuni disastri effettivamente verificatisi, (ricordiamo in Italia la tragedia del Vajont, nel cui caso però non fu la diga a cedere ma il bacino a traboccare per effetto della caduta nello stesso di una falda montana).
La realizzazione di bacini artificiali può variare notevolmente equilibri ambientali migliorando le portate idriche oppure interferendo nella deposizione del limo trasportato dai fiumi.
In ogni caso, gli impianti idroelettrici vengono generalmente esclusi dagli studi comparati sui costi di generazione dell'energia, in quanto essi dipendono più dalle caratteristiche specifiche del luogo in cui sorgono, che dalle tecnologie disponibili. Inoltre, nei paesi OCSE quasi tutti luoghi sfruttabili per produrre energia idroelettrica sono già stati usati. Al contrario, vi è un alto potenziale di sfruttamento di questa fonte rinnovabile al di fuori delle nazioni OCSE come alternativa economicamente valida.[258]

---

[258] Cfr.: NEA, IEA, *Projected costs of generating electricity. Update 1998*, OECD Publications, Paris Cedex 1998.

A.8 – L'Energia solare

Il suo utilizzo segue tre indirizzi:

- produzione di calore a bassa temperatura
- conversione termodinamica
- conversione fotovoltaica.

In tutti e tre i casi il principio base è quello di raccogliere le radiazioni solari e di concentrarle in modo da renderle utilizzabili.
Nella produzione di calore a bassa temperatura, l'energia solare viene usata direttamente per il riscaldamento dell'acqua fino ad una temperatura di circa 50°C.
Nella conversione "termodinamica", l'energia viene raccolta da specchi e poi concentrata su una caldaia posta su una torre; la caldaia produce del vapore che aziona una piccola turbina.
Infine, nella conversione fotovoltaica, l'energia solare viene convertita in energia elettrica direttamente utilizzando le celle al silicio.
Il vantaggio principale dell'energia solare è che la fonte di energia è del tutto gratuita e non inquinante. Di contro però le installazioni sono molto costose ed ingombranti e generano energia utilizzabile solo a livello locale.[259]

A.9 – L'Energia eolica

L'energia eolica è un'energia derivata dal vento: il principio è quello di far girare un'elica solidale con il rotore di un piccolo alternatore. In effetti è molto simile al funzionamento di un mulino a vento, solo che in questo caso l'energia non viene utilizzata come energia meccanica ma trasformata in energia elettrica. La massima potenza di un generatore di questo tipo è attualmente di 70 KW.
Essendo però il vento una fonte di energia piuttosto discontinua, uno dei metodi per sfruttarla al meglio è quello di usarla per caricare batterie di accumulatori, in modo da immagazzinarla onde poterla poi utilizzare in seguito in modo continuativo.
In Italia questo tipo di energia è poco sfruttabile a causa della poca ventosità del territorio. Un tentativo di sperimentazione è tuttora in funzione in Sardegna nell'Alta Nurra (Porto Tornese) [260]

A.10 – L'Energia geotermica

Questa energia viene derivata dal naturale calore della superficie terrestre, sfruttando alcune zone in cui l'acqua ha una temperatura più alta di quella ambientale. La potenza generata è generalmente modesta.
L'Italia è stata tra le prime nazioni a sfruttare questa fonte di energia, iniziando già nel secolo scorso e proseguendo, nel 1904, con lo sfruttamento del bacino del Lardello in Toscana, ed arrivando ai nostri giorni con le sue 13 centrali elettriche raggiungendo una potenza complessiva installata di circa 400MWe.

A.11 – La bioenergia

Il biogas è un gas combustibile proveniente dal letame delle fattorie opportunamente trattato. La centralina azionata dal biogas è una centrale turbogas in piccola scala, ma è in grado di fornire solo una potenza di una decina di chilowatt.
Le biomasse sono tutti i materiali organici, di origine animale o vegetale, che possono essere trasformati in fonti di energia.

---

[259] Cfr. anche: Hoagland W., *Energia solare*, in "Energie pulite", in "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 47-50.
[260] Cfr. anche: Moretti P.M., Divone L.V., *Le macchine eoliche*, in "Energie pulite", in "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 54-59.

Esempi di uso delle biomasse sono l'idrolisi acida ed enzimatica per la produzione di alcool e derivati e l'uso della produzione di fotosintesi per la produzione di idrogeno. Lo sfruttamento di quest'energia può funzionare dove ci sia abbondanza di materia prima locale come in campagna o nelle fattorie. Negli Stati Uniti questa è una fonte energetica molto sfruttata, la quale fornisce circa il 18% della produzione nazionale di energia.[261]

A.12 – L'energia dai rifiuti urbani

Quasi del tutto inesistente è l'utilizzo dei rifiuti urbani per produrre energia. Il sistema in uso che negli ultimi anni ha attraversato una notevole evoluzione tecnologica, è soprattutto necessario per l'eliminazione dei rifiuti limitando notevolmente il limite di inquinamento possibile.

A.13 – Aspettative di sviluppo delle fonti rinnovabili in Europa

Come abbiamo già avuto modo di dire, la Commissione Europea ha fissato al 12% l'obiettivo per il contributo alla produzione di energia dalle fonti rinnovabili nel 2010, puntando in particolare sullo sviluppo della biomassa e dell'eolico, ma lasciando liberi i singoli paesi nell'organizzazione delle proprie politiche energetiche. La decisione è derivata tanto dalla maggiore sensibilità nei confronti dell'ambiente, quanto dallo studio delle effettive potenzialità di queste fonti (tab. A.1).

Tab. A.1 – Potenziale contributo energetico delle fonti rinnovabili nell'EU.

Fonte	Potenziale	
	Mtep	%
Solare	68	3,8
Eolico	75	4,2
Biomasse mod.	110	6,1
Mini-idro	43	2,4
Maree	55	3
Geotermia	5	0,3
Totale nuove FR	356	19,8
Totale FR tradiz.	120	6,7
Totale FR	476	26,5
Fabbisogno EU	1.800	100

Nota: Biomasse mod. = uso moderno delle biomasse
FR = fonti rinnovabili

Fonte: Garozzo M., *Le fonti rinnovabili di energia*, in "Energia pulite", "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 2-11.

In tal modo, è stato previsto che, entro il 2010, l'EU dovrebbe coprire il 23,5% della propria generazione di elettricità attraverso le fonti rinnovabili, ma, di nuovo, buona parte di questa energia verrebbe fornita dall'idroelettrico, cosicché solo il 12% circa verrebbe prodotto dalle nuove rinnovabili.

---

261 Cfr. anche: Hall D.O., House J., *La biomassa come combustibile moderno*, in "Energie pulite", in "Le scienze", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 67-74.

Tab. A.2 – Produzione attuale e prevista di elettricità dalle fonti rinnovabili nell'EU.

Fonte	Produzione 1995		Produzione 2010	
	TWh	%	TWh	%
Eolica	4	0,2	80	2,8
Idroel. Totale	307	13	355	12,4
grande idro	270	11,4	300	10,5
mini-idro	37	1,6	55	1,9
Solare	0,03	/	3	0,1
Biomassa	22,5	1	230	8
Geotermia	3,5	0,1	7	0,2
Totale FR	337	14,3	675	23,5
Totale	2.366	100	2.870*	100

Nota: * = pre-Kyoto; FR = fonti rinnovabili

Fonte: De Paoli L., Lorenzoni A. (a cura di), *Economia e politica delle fonti rinnovabili e della cogenerazione*, collana Economia e politica dell'energia e dell'ambiente, Franco Angeli, Milano 1999.

A.16 –Stime dei costi di generazione d'elettricità dalle fonti rinnovabili

Sebbene oggigiorno siano commercialmente disponibili varie forme di energia rinnovabile, quali fotovoltaiche (energia solare), biomasse ed eoliche, soltanto tre paesi (Italia, Paesi Bassi e Stati Uniti) hanno fornito all'IEA dei dati sui costi attesi per la produzione di elettricità da biomassa e vento. Inoltre, il grado di sviluppo e l'esperienza sulle fonti rinnovabili non è ancora sufficiente per produrre delle stime affidabili e paragonabili a quelle sugli impianti tradizionali (combustibili fossili e nucleari).

<u>Costi di investimento attesi per le fonti rinnovabili</u>

In linea generale, i costi di costruzione attesi per le fonti rinnovabili sono molto vicini a quelli del carbone, variando infatti tra i 937 $/kWe della cogenerazione in Danimarca ai 1342 $/kWe della biomassa negli USA, escludendo però la turbina a vapore danese e le centrali eoliche *off-shore*. In effetti queste ultime, pur avendo un costo più che doppio rispetto ai normali "mulini a vento", avrebbero anche una potenza installata di produzione d'elettricità maggiore di ben dieci e più volte. Comunque, gli alti costi di costruzione, e di esercizio e manutenzione, degli impianti *off-shore* dovrebbero essere considerati tenendo conto del loro tasso di disponibilità, pari al 35% contro il 25% delle centrali eoliche a terra.

<u>Costi di esercizio e manutenzione per le fonti rinnovabili</u>

Per queste tecnologie i costi di O&M variano significativamente a causa della varietà e della taglia degli impianti. In ogni caso, i costi attesi minori riguardano le centrali eoliche a terra in Danimarca e Italia (rispettivamente: 14,20 e 16,29 $/kWe), mentre i più alti sono quelli degli impianti di cogenerazione e a vapore (rispettivamente 85,18 e 136,29 $/kWe) danesi.

<u>Costi di generazione totali</u>

Si può a questo punto vedere come i costi generazione di elettricità attesi siano in assoluto minori negli USA per gli impianti che sfruttano la biomassa (29,95 USmill/kWh), mentre i più cari siano le turbine a vapore della Danimarca (94,24 USmill/kWh). In ogni caso si noti come le centrali eoliche, tanto quelle danesi quanto quelle italiane, risultano competitive per il costo totale, ma come in realtà si trovino davanti agli stessi problemi del nucleare a causa degli alti costi di investimento, che coprono circa l'80% dei costi finali.[262]

[262] Cfr.: NEA, IEA, Projected costs of generating electricity. Update 1998, op. cit.

Tab. A.3 – Costi totali di generazione di elettricità attesi per le rinnovabili al tasso di sconto del 5% in USmill/kWh (ipotesi standard).

Paese	Invest.	% Ctot	O&M	% Ctot	Comb.	% Ctot	Totale
Dan. CHP	8,98	13	13,10	19	45,70	67	67,78
Dan. ST	32,65	35	20,96	22	40,62	43	94,24
Dan. W1	27,26	80	6,98	20	0	0	34,24
Dan. W2	37,31	80	9,54	20	0	0	46,85
Italia W1	46,05	84	8,73	16	0	0	54,78
USA Bio	14,11	47	7,11	24	8,74	29	29,95

Nota: Dan. = Danimarca; CHP = cogenerazione; ST = turbina a vapore; W1 = eolico a terra; W2 = eolico in mare; Bio = biomassa
Fonte: Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, *Projected costs of generating electricity. Update 1998.*

Infine, vogliamo far notare come sono abbondantemente sfruttate le risorse rinnovabili negli USA, sebbene anche in tal caso esse non coprano che una minima parte della domanda di elettricità americana, che come sappiamo è una delle più alte al mondo. Si noti, in ogni caso, l'alta produzione di elettricità derivante dall'idroelettricità, che copre circa il 10% della generazione nazionale di energia elettrica e più dell'80% di quella prodotta dalle fonti rinnovabili. Questo nonostante il fatto che le potenziali riserve nazionali non vengano utilizzate a sufficienza; in effetti, il problema è dovuto soprattutto all'alto numero di contestazioni da parte degli ambientalisti per la creazione di ogni diga, a causa dei danni alle popolazioni di pesci presenti nel bacino, come afferma il *Department of energy*[263].

Tab. A.4 – Generazione di elettricità da fonti rinnovabili negli USA, dal 1990 a settembre 1999 (MWh).

Period	All Renewable	Hydroelectric	Geothermal	Biomass	Wind	Photovoltaic
1990..................	294,085,003	283,433,659	8,581,228	2,067,270	398	2,448
1991..................	290,197,798	280,060,621	8,087,055	2,046,499	285	3,338
1992..................	253,936,260	243,736,029	8,103,809	2,092,945	308	3,169
1993..................	278,663,780	269,098,329	7,570,999	1,990,407	243	3,802
1994..................	256,003,613	247,070,938	6,940,637	1,988,257	309	3,472
1995..................	302,786,828	296,377,840	4,744,804	1,649,178	11,097	3,909
1996..................	338,272,331	331,058,055	5,233,927	1,967,057	10,123	3,169
1997..................	348,735,082	341,273,447	5,469,110	1,983,067	5,977	3,481
1998	316,049,752	308,843,754	5,176,280	2,024,243	2,957	2,518
1999..................	240,904,788	237,776,851	1,657,844	1,454,008	13,612	2,473

Fonte: Energy Information Administration, *Form EIA-759*, in "Monthly Power Plant Report.".

A.13 – La storia scientifica del CERN

Nel 1954, un numero sufficiente di paesi aveva dato il suo consenso affinché potesse cominciare sul sito rurale di Meyrin, vicino a Ginevra, la costruzione di un acceleratore di particelle: un sincrociclotrone che destinato ad accelerare i protoni fino a 600 MeV.
Il CERN cominciò a costruire una macchina molto potente: il sincrotrone a protoni (PS), che entrò in servizio nel novembre 1959, fornendo agli sperimentatori dei fasci di protoni di 28 GeV. Più di trent'anni dopo, il PS resta lo spinotto d'unione del sistema (senza pari nel mondo) degli acceleratori interconnessi del CERN.

[263] Cfr.: DOE, *Hydropower*. Sito Internet: http://www.doe.org/hydro.html

Tra il 1971 e il 1984, il CERN ha utilizzato un nuovo tipo di macchina: gli anelli di stoccaggio a intersezione (ISR) costruiti su un'estensione, in territorio francese, del sito di Meyrin. Due fasci di protoni, precedentemente accelerati nel PS, vengono immagazzinati nei due anelli interconnessi e poi proiettati gli uni contro gli altri. Gli ISR hanno permesso agli scienziati di acquisire una preziosa esperienza nella costruzione e utilizzazione di questo genere di macchine.
Agli inizi degli anni settanta cominciarono i lavori per una nuova grande macchina, il supersincrotrone a protoni (SPS). Esso ha prodotto i suoi primi fasci di protoni di 400 GeV nel 1976 e, più tardi, la sua energia è arrivata a 450 GeV. Per accogliere questo anello di 7 km, il sito del CERN si è esteso più lontano in Francia, fino a Prevessin: i protoni attraversano due volte la frontiera ad ogni giro di SPS.
Lo SPS aveva appena raggiunto il suo regime di crociera, che fu avanzata l'ardita proposta di utilizzarlo come collisore di particelle. Si trattava di d'accelerare nell'anello esistente, ma in sensi opposti, i protoni e gli antiprotoni e di produrre delle collisioni tra di loro. Gli antiprotoni sono molto rari (circa uno ogni centomila protoni), ma per l'esperimento ne erano necessari circa un miliardo alla volta. La scommessa è stata vinta grazie ad una nuova tecnica (il "raffreddamento stocastico"), che ha permesso di controllare i preziosi antiprotoni in modo da formare un fascio intenso.
Nel 1983, l'idea ha portato i suoi frutti con la scoperta delle particelle W e Z, i messaggeri della forza nucleare debole. Tale scoperta confermava un'elegante teoria, detta "elettrodebole", che unifica la forza debole con l'elettricità e il magnetismo, e che consiste in uno dei più grandi successi de ventesimo secolo. La scoperta delle particelle W e Z, da parte di Carlo Rubbia e della sua *équipe*, e la messa a punto del raffreddamento stocastico, da parte di Simon van der Meer, hanno valso a questi due ricercatori il premio Nobel per la fisica nel 1984.[264]
Nello stesso tempo erano stati terminati i progetti per il LEP (grande anello elettroni-positroni), i lavori cominciarono nel 1983 e nel 1989 esso entrò in funzione.
Per il futuro, il CERN ha già iniziato la realizzazione del LHC (grande collisore di adroni), che consiste nell'installare un anello di potenti magneti superconduttori, nel tunnel del LEP, per fare entrare in collisione fasci di protoni che raggiungono gli 8 TeV (=8000 GeV). Con LHC, il CERN sarà il più importante laboratorio mondiale per la fisica delle particelle, poiché disporrà dell'acceleratore più avanzato del mondo.

A. 14 – L'utilità del CERN: la discesa dentro l'atomo.

Per vedere degli oggetti sempre più piccoli si ha bisogno di microscopi via via più potenti. L'invenzione del microscopio ottico nel XXII sec. ha rivelato un mondo nuovo, invisibile all'occhio nudo.
La potenza di un microscopio dipende dalla lunghezza d'onda dell'irraggiamento che utilizza: più corto è questa lunghezza d'onda più piccoli sono i dettagli discernibili. A una riduzione della lunghezza d'onda corrisponde un aumento dell'energia.
Allo stesso modo, il microscopio elettrico del XX sec. svela la struttura delle molecole fino a un milionesimo di millimetro. Gli atomi, però, hanno una dimensione leggermente minore.
Come ha mostrato Rutherford nel 1911 lo spazio all'interno dell'atomo è vuoto per il 99,99%. Se infatti immaginiamo di estendere un atomo alla grandezza di un campo da calcio, il suo nucleo, formato da protoni e neutroni e portante i 99,97% della massa atomica, non arriva neanche alla grandezza di un pallone, ma solo a quella di una biglia. Dunque, per guardare all'interno del nucleo abbiamo bisogno di lunghezze d'onda ancora minori e quindi di energie ancora più alte, ed è qui che gli acceleratori di particelle entrano in gioco.
Se ripetiamo l'esperimento mentale di cui sopra e dilatiamo un protone o un neutrone fino alla grandezza di un campo da calcio, appaiono tre costituenti principali (i *quark*), i quali a loro volta

---

[264] Carlo Rubbia è poi stato Direttore generale del CERN dal 1989 al 1994.

avranno ora la grandezza di una biglia. Con gli attuali acceleratori siamo arrivati ai *quark*; è difficile realizzare degli acceleratori ancora più potenti, ma, per fortuna, gli scienziati ritengono che i *quark* sono i componenti ultimi della materia.
Le energie di particelle quali gli elettroni e i protoni sono normalmente misurati in elettronvolt (eV) - dove un elettronvolt è l'energia acquisita da un elettrone sotto l'influenza di una differenza di tensione elettrica di un volt. Delle energie di qualche eV sono sufficienti per estrarre degli elettroni dagli atomi e per produrre così dei fotoni e del calore.
Proiettili aventi energia di qualche milione d'elettronvolt (MeV) arrivano a sondare in profondità il nucleo degli atomi e a vederne i costituenti, protoni e/o neutroni. Con un'energia di migliaia di milioni di elettronvolt (GeV) i fisici costatano la presenza di tre minuscoli granelli indivisibili, i *quark*.
La celebre equazione di Einstein ($E=mc^2$) ci insegna che l'energia e la massa sono equivalenti. Così, l'energia di un fascio di particelle può convertirsi in massa e creare una profusione di diverse e affascinanti particelle supplementari molto instabili e non presenti in natura. Ma disponiamo di un'energia ancora maggiore per creare delle nuove particelle se provochiamo delle collisioni tra due fasci che circolano in sensi opposti. Tutti i più importanti progetti attuali in fisica sono incentrati su questo genere di macchine a collisione di fasci.[265]
Il CERN è stato creato per permettere ai paesi fondatori di essere all'avanguardia nella ricerca e di tenere il passo con Stati Uniti e Unione Sovietica, concentrando in un unico laboratorio risorse che non sarebbero state reperibili nei singoli paesi.
Un altro degli aspetti positivi del CERN è stato il fatto di aver fermato, se non addirittura invertito, la "fuga di cervelli" verso gli USA, assai forte negli Anni '50.
È stato calcolato che le imprese europee che hanno collaborato con il CERN abbiano messo a frutto, sul piano industriale, le tecnologie sviluppate per la ricerca, triplicando il loro *share* di mercato.[266]

A.15 – Alcune precisazioni sull'*Energy Amplifier*

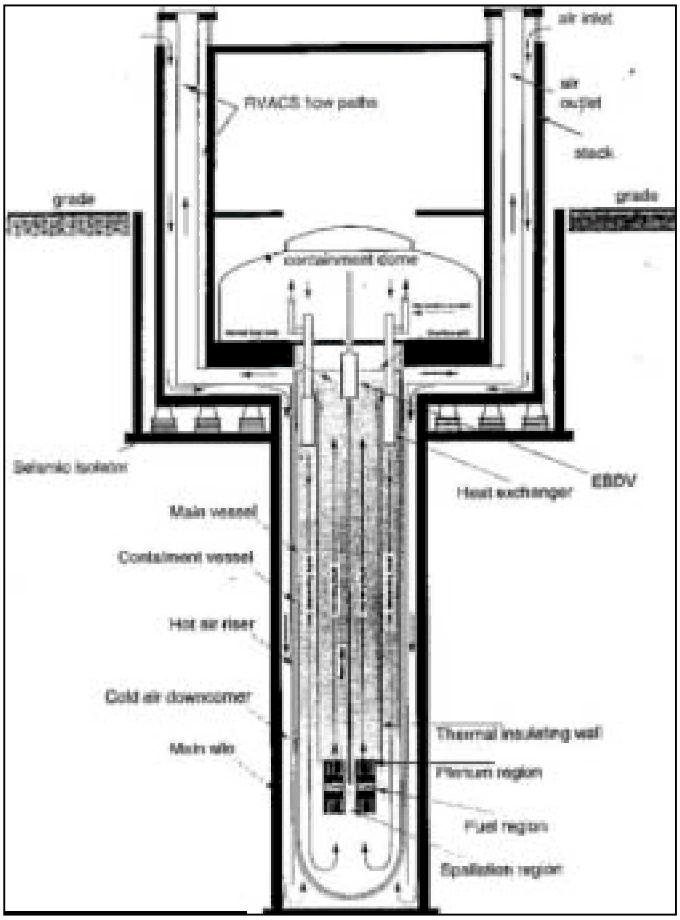
L'*Energy Amplifier* deve il suo nome al fatto che con un fattore sottocritico k di 0,98 e un fascio di protoni da 1 GeV – 12,5 mA (che corrispondono a 12,5 MW), si ottiene un fattore di amplificazione di energia pari a 120 (il che è molto attraente per la produzione di energia). Ciò significa che si ottengono 1500 MW (12,5 MW x 120) di energia termica e che, tramite appositi scambiatori di calore, si hanno circa 650 MW di energia elettrica.
L'uso del piombo nell'EA presenta, tra gli altri, i vantaggi di non assorbire neutroni e di non reagire facilmente al contatto con l'acqua e con l'aria. Nel contenitore dell'EA il piombo circola ad una temperatura di 560°C e, partendo dal nocciolo sotto l'effetto della dilatazione dovuta al calore, sale fino alla sommità del recipiente dove entra in contatto con uno scambiatore che estrae da esso il calore necessario a far funzionare le turbine dei generatori di elettricità. In questo modo, una volta raffreddatosi (senza la necessità di apposite pompe primarie, che sono costosissime) il piombo torna al fondo, pronto per un nuovo giro.
Tra i sistemi di sicurezza passiva ci sono da notare alcuni comportamenti del piombo: in caso di riscaldamento eccessivo del nocciolo, la dilatazione del piombo fuso sarebbe tale da portare questo fluido fino all'interno del tubo da cui arrivano i protoni, impedendo loro di entrare nel nocciolo.
L'EA può funzionare per cinque anni con un totale di 27 tonnellate di combustibile, in modo da produrre una potenza elettrica di 600 MWe, dopo questo periodo deve essere lasciato raffreddare per un mese, prima di poter sostituire il nocciolo. A questo punto è stato bruciato solo i 25% del torio iniziale e ci sono ancora due tonnellate di U^{233} formate per cattura neutronica dal torio.

---

[265] Le informazioni fin qui riportate sono state tratte da svariati opuscoli informativi di presentazione del CERN. Cfr.: CERN, *Le CERN: un example de coopération scientifique internationale*, Publications CERN, Geneva Avril 1991.
[266] Anonimo, Seguito dell'indagine conoscitiva sulle organizzazioni internazionali con particolare riferimento al ruolo e alla presenza dell'Italia: audizione del Direttore generale del centro europeo per la ricerca nucleare (CERN). Sito Internet: http://www.senato.it/notes/ODG_PUBL/ 1dae6.htm

Questo combustibile spento è ancora utilizzabile, ma solo dietro preventivo trattamento. In ogni caso, siccome "rende il doppio in energia, il combustibile da trattare è due volte meno abbondante", inoltre non c'è bisogno di separare il materiale fissile. Resta comunque un punto di difficile valutazione il costo di trattamento del combustibile spento dell'EA. Infine, l'utilizzo di neutroni veloci offre interessanti prospettive per il riprocessamento delle barre irradiate (le barre di combustibile già usate). Il riprocessamento sarà limitato alla separazione degli prodotti della fissione. Tutti gli attinidi diventano passibili di combustione: la sola scoria attinide dell'EA (lo 0,5%) deriverà da imperfezioni nel processo di separazione. I frammenti di fissione possono essere riciclati nelle barre in quanto il flusso neutronico li trasforma in elementi non radioattivi, ma tale trasformazione cattura neutroni e quindi riduce la produzione di energia. Per questo si è pensato di utilizzare questo "costoso" processo solo per gli elementi che sono a lunga vita (vari milioni di anni) e quindi inquinanti.[267] Ma per una comprensione maggiore di quanto avviene all'interno dell'*Energy Amplifier* si osservi la fig. A.1, che mostra in dettaglio l'intero sistema, all'interno del quale avvengono le reazioni fin qui descritte.

Fig. A1 – Schema completo della struttura dell'Energy Amplifier



Fonte: Rubbia C., *L'atomo che piace ai verdi*, in "Galileonet", anno III, n.10, settembre/ottobre 1998.
Sito Internet: http://www.galileonet.it/archivio/index.html

[267] Cfr. Anonimo, The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand, CERN Courier, vol.35, n.3, May 1995, pag. 15-19.

GLOSSARIO

ACCELERATOR DRIVEN SUBCRITICAL SYSTEM (ADS)

Sistema sottocritico guidato da un acceleratore.

ARRICCHIMENTO

L'arricchimento è quel processo a cui viene sottoposto l'uranio naturale (costituito per il 99,3% da uranio 238 per lo 0,7% da uranio 235), usato nelle attuali centrali nucleari, e che permette di portare la percentuale di uranio 235 fino al 3%, in modo da ottenere il cosiddetto uranio arricchito, il quale costituisce il combustibile dei reattori nucleari.

ATTINIDI MAGGIORI e MINORI

Gli attinidi sono tutti elementi il cui numero atomico è superiore a 89. Gli attinidi maggiori sono degli isotopi di plutonio e uranio, presenti in grande quantità all'interno del combustibile già utilizzato. Gli attinidi minori sono invece degli isotopi di americio, nettunio e curio, presenti in quantità minori.

BARRE DI COMBUSTIBILE

Le barre di combustibile nucleare sono dei lunghi tubi che contengono il combustibile, generalmente montate insieme fino ad un numero di 300 barre, per essere introdotte nel reattore.

BARRE DI CONTROLLO

Sono delle barre che contengono dei materiali capaci di assorbire i neutroni e che possono essere inserite o rimosse dal nocciolo del reattore in modo da controllare il fattore di criticità in modo esatto.

BURN-UP (TASSO DI)

Il tasso di *burn-up* è la quantità di energia estraibile dal combustibile nucleare prima che esso debba essere rimosso dal nocciolo del reattore.

BWR

I *Boiling Water Reactor* sono i reattori ad acqua bollente, cioè dei reattori nucleari dove l'acqua utilizzata per raffreddarli viene trasformata in vapore attraverso l'ebollizione. Per una semplice spiegazione del loro funzionamento si veda l'appendice, par. A.1.

CARICO DI BASE

Il carico di base è la parte di elettricità richiesta dall'impianto che non varia in un determinato intervallo di tempo.

CARICO DI PUNTA

Il carico di punta è la massima energia che deve essere fornita da un impianto durante un dato periodo di tempo.

CATTURA NEUTRONICA

La cattura neutronica consiste nel fatto che il nucleo di un elemento "assorbe" un neutrone aggiuntivo e diventa un isotopo di quello stesso elemento. Essa è il primo passo della trasmutazione, in quanto in seguito alla cattura del neutrone l'elemento diventa generalmente instabile e quindi si trasforma in un altro elemento –questa volta stabile - attraverso il decadimento radioattivo e la fissione.

CICLOTRONE

Un acceleratore in cui le particelle si muovono in un campo magnetico costante, così più esse hanno energia, più si muovono su un orbita più larga. Questo porta le particelle a descrivere un percorso a spirale.

COMBUSTIBILI MOX

I combustibili MOX sono dei combustibili a base di ossidi misti (*Mixed OXide*) di uranio e plutonio che possono essere utilizzati nei reattori termici, nei reattori veloci e nell'EA.

DECADIMENTO RADIOATTIVO

Il decadimento radioattivo consiste nell'emissione di raggi α (nuclei di elio, e cioè due protoni e due neutroni), o di raggi β (elettroni o positroni, cioè elettroni con carica positiva) o di raggi γ (fotoni) da parte di un nucleo (e quindi un elemento) radioattivo. Si parla di "vita media" o di “periodo di dimezzamento” per definire l’intervallo di tempo necessario affinché decada la metà degli atomi inizialmente presenti. Per l’uranio 235 la vita media è $0{,}7038 \cdot 10^9$ anni, mentre per l’uranio 238 è di $4{,}468 \cdot 10^9$ anni.

DOSE

La dose assorbita è l’energia assorbita da una persona dal decadimento di un nucleo radioattivo. L’unità di misura per grammo di tessuto è il *gray* (Gy).

La dose equivalente è la dose assorbita aggiustata per la dannosità di diversi tipi di radiazioni. La sua unità di misura è in *sievert* (Sv).

La dose effettiva equivalente è la dose equivalente aggiustata per la diversa suscettibilità dei vari tessuti al danno. La si misura in *sievert.*

La dose collettiva (in realtà la dose collettiva effettiva equivalente) è la dose effettiva equivalente per un gruppo di persone esposti ad una sorgente di radiazioni. Essa è uguale alla media della dose effettiva equivalente moltiplicato per il numero di persone. L’unità di misura è il *man sievert* (man Sv).

EFFICIENZA

L’efficienza è la misura della quantità di energia utile prodotta come una percentuale delle risorse primarie utilizzate.

FATTORE DI CARICO

Il fattore di carico è la percentuale del potenziale *output* degli impianti che è normalmente prodotto nel corso di un annuo. È usato per misurare la *performance* dell’impianto.

FATTORE DI CRITICITÀ k_{eff}

Il fattore critico è una caratteristica della reazione a catena dentro un reattore nucleare:

- se $k < 1$, il reattore è detto sottocritico
- se $k = 1$, il reattore è critico, può essere controllato e funziona attorno a questo valore
- se $k > 1$, il reattore è supercritico, può fondere e non può essere controllato.

L’EA è un reattore sottocritico, il che significa che non può fondere e può “facilmente” essere controllato e dunque presenta una sicurezza intrinseca, in quanto data da leggi fisiche.

FRAMMENTI DI FISSIONE

I frammenti di fissione sono gli elementi che derivano dalla frattura degli atomi di uranio durante la reazione nucleare. Anch'essi sono scorie radioattive, ma circa 20.000 volte meno pericolose dei transuranici, poiché, tranne rari casi, hanno una vita media variabile tra poche decine o poche centinaia di anni.

PWR

I *Pressurized Water Reactor*, ovvero reattori ad acqua pressurizzata, sono dei reattori nucleari in cui l'acqua pesante usata per raffreddarli viene mantenuta alla stato liquido, attraverso la pressione. Se invece dell'acqua normale usano l'acqua pesante si chiamano PHWR, cioè *Pressurized Heavy Water Reactor*. Per una semplice spiegazione del loro funzionamento si veda l'appendice A.1.

REATTORI TERMICI

Si tratta di reattori in cui i neutroni vengono rallentati da una serie di collisioni più o meno elastiche nel materiale che costituisce il moderatore.

REATTORI VELOCI

Si tratta di reattori che presentano neutroni altamente energetici e quindi con elevate energie cinetiche che vanno da qualche keV a svariati MeV.

REAZIONE A CATENA

Una reazione che inizia la propria ripetizione e che quindi si autosostiene. Nella fissione nucleare un neutrone induce la fissione in un nucleo, il quale emette altri neutroni che causeranno ulteriori fissioni negli atomi vicini.

REFRIGERANTE

Il fluido refrigerante circola all'interno dei circuiti di raffreddamento (il circuito primario e quello secondario) e può essere di diversa natura: acqua, metalli liquidi, gas. All'interno dell'EA il fluido di raffreddamento proposto è il piombo liquido.

RIPROCESSAMENTO

Il riprocessamento è il trattamento chimico del combustibile usato da un reattore nucleare per separare l'uranio ed il plutonio inutilizzati dai residui radioattivi (i prodotti della fissione). Questo permette di riciclare parte del combustibile e minimizza il volume delle scorie altamente pericolose.

SINCROTRONE

Un acceleratore in cui il campo magnetico, che incurva le orbite delle particelle, aumenta con l'energia delle particelle. Questo fa sì che le particelle si muovano lungo un percorso circolare.

SPALLAZIONE

La spallazione è un processo nel quale le particelle (i protoni nel nostro caso), che sono sospinte contro un bersaglio di nuclei pesanti (costituito dal piombo, nell'EA) vengono talmente accelerate che le forza che legano protoni e neutroni diventano trascurabili rispetto all'energia del proiettile. Dall'urto si ottiene così l'emissione di energia e di neutroni ad alta velocità, i quali verranno poi sfruttati per dare adito alla trasmutazione.

Tep (Tonnellata equivalente di petrolio)

Si tratta dell'unità di misura più utilizzata nel mercato energetico, sebbene i coefficienti di conversione vari di alcuni punti decimali a seconda dei paesi per una serie di ragioni storiche. Qui di seguiti diamo le conversioni in uso nei paesi europei dell'OCSE.

1 Tep = 1.270 m^3 di metano

1 Tep = 2,7 tonnellate di carbone

1 Tep = 7,50 barili di petrolio

1 Tep = 11,6 TWh

TORIO

Il torio è il 90° elemento della tavola periodica. Esso è estratto come sottoprodotto della criptolite, un minerale delle terre rare. Abbondanti depositi di torio sono sparsi in tutto il mondo: USA, Canada, Francia, Norvegia, ex-URSS e Australia, sebbene il paese più ricco di questo elemento sia l'India (360.000 Ton). I maggiori produttori di criptolite (e quindi indirettamente di torio) sono India, Brasile, Malesia, Cina e Sri Lanka. Per avere un'idea di quanto ristretto sia attualmente il mercato del torio basta l'esempio degli USA, dove nel 1997 il consumo interno di torio è stato di 13 tonnellate per un valore di soli 300.000 US$.

Deborah Sessano

TRASMUTAZIONE

La trasmutazione nucleare è la trasformazione di un elemento in un altro attraverso una reazione nucleare, generalmente prodotta mediante irradiazione da flussi di neutroni d'energia adeguata. Nel caso delle scorie radioattive, per i prodotti di fissione il processo nucleare indotto è la cattura neutronica, invece per i transuranici e gli attinidi minori è la fissione. In questo modo le scorie vengono trasformate in altri elementi a vita media più corta o addirittura stabili.

Ma allo stesso modo, la trasmutazione nucleare può essere utilizzata per attivare degli elementi stabili e produrne isotopi radioattivi, finalizzati ad usi diversi: generazione di energia, traccianti per analisi radiologiche, terapia contro il cancro.

TRANSURANICI

I transuranici sono elementi con numero atomico superiore a 92 (il numero atomico dell'uranio), i quali non esistono in natura e vengono prodotti artificialmente o nelle centrali nucleari – come nel caso di plutonio, nettunio e americio – o nei centri di ricerca di fisica nucleare tramite gli acceleratori di particelle.

BIBLIOGRAFIA

TESTI

Mercato energetico

Anonimo, I nuovi assetti del settore energetico: la privatizzazione e le Direttive europee, in Salvi L. A. (a cura di), Conferenza nazionale energia e ambiente, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 - XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999, pp. 110-112.

Anonimo, Produzione energetica nazionale e dipendenza dall'estero, in Salvi L. A. (a cura di), Conferenza nazionale energia e ambiente, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 - XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999, pp. 109-110.

International Energy Agency, Energy statistics of OECD countries 1995-1996, 1998 Edition, IEA Publications, Paris Cedex 1998.

International Energy Agency, Energy policies of IEA countries, 1998 Review, IEA Publications, Paris Cedex 1998.

Nuclear Energy Agency, International Energy Agency, Projected costs of generating electricity. Update 1998, OECD Publications, Paris Cedex 1998.

CERN e Energy Amplifier

CERN, Le CERN: un example de coopération scientifique internationale, Publications CERN, Geneva Avril 1991.

Fernàndez R., Mandrillon P., Rubbia C. , Rubio J.A., A preliminary estimate of the economic impact of the Energy Amplifier, CERN/LHC/96-01 (EET), CERN, Geneva 1996.

Husson J.P., de Montgolfier P., A nuclear amplifier for energy for electricity production. Final study, European Parliament, Directorate General for Research, the STOA (Scientific and Technological Option Assessment) Programme, Luxembourg June 1999.

Klapisch R., Vers une approche nouvelle de l'énergie nucläéaire. Contribution à la séance du 23 Mai 1997 du groupe de travail "Ethique de l'énergie: le devoir de recherche", CERN, Geneva 1997, (per gentile concessione del CERN).

Rubbia C., Buono S. et al., A realistic endurance test of the target window of the Energy Amplifier (NICE), CERN/ET/Internal note 97-06, CERN, Geneva 1997, (per gentile concessione del CERN).

Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al., Conceptual design of a fast neutron operated high power Energy Amplifier, CERN/AT/95-44 (ET), CERN, Geneva 1995.

Rubbia C., Buono S. et al., Fast neutron incineration in the Energy Amplifier as alternative to geological storage: the case of Spain, CERN/LHC/97-01 (EET), CERN, Geneva 1997.

Rubbia C. et al., Interim report of the Technical Working Group on accelerator driven sub-critical system, CERN, Geneva October 1998, (per gentile concessione del CERN).

Rubbia C., Resonance enhanced neutron captures for element activation and waste transmutation, CERN/LHC/97-04 (EET), CERN, Geneva 1997.

Energia nucleare

Anonimo, Relazione introduttiva, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 11-48.

Cerè L., L'energia nucleare. Aspetti tecnici, economici e ambientali, G. Giappichelli Editore, Torino 1991.

Charpak G., Garwin R.L., Il fuoco del 2000. L'energia nucleare nel terzo millennio, Baldini & Castoldi, Milano 1999.

Cumo M., Naviglio A., Sorabella L., Competitività dell'energia elettronucleare, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp.127-153.

Curcio E., Scenari energetici di medio e lungo periodo, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 63-72.

Fornaciari P., Ripensiamo al nucleare, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, a cura di Ugo Spezia, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 53-62.

Garibba S., Innovazione tecnologica e mercato dell'energia elettrica, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 73-86.

Ricci R.A., Il ruolo del nucleare nelle strategie ambientali, in Spezia, U. (a cura di), Energia nucleare. Un futuro da salvare, Atti della Conferenza nazionale sul tema "Il ruolo del nucleare nel programma energetico nazionale", Associazione Italiana Nucleare, Roma, 20 novembre 1998, 21mo secolo, Milano 1999, pp. 95-108.

Spezia U. (a cura di), Attualità del nucleare. Energia e tecnologia, Atti della Giornata di studio AIN 1999, Roma, 23 novembre 1999, 21mo secolo, Milano 2000.

Fonti fossili e rinnovabili
De Paoli L., Lorenzoni A. (a cura di), Economia e politica delle fonti rinnovabili e della cogenerazione, collana Economia e politica dell'energia e dell'ambiente, Franco Angeli, Milano 1999.

Fornaciari P., Il petrolio, l'atomo e il metano. Italia nucleare 1946-1997, 21mo Secolo, Milano 1997.

Vitagliano G., Energia per tutti. Un'esposizione chiara per capire meglio l'energia, 21mo Secolo, Milano 1998.

R&S
Zecchino O., Intervento alla conferenza nazionale energia e ambiente, in Salvi L. A. (a cura di), Conferenza nazionale energia e ambiente, Annuario Nazionale dell'energia e dell'ambiente 1999 - XVII edizione, INTER/ED, Roma 1999, pp. 64-66.

ARTICOLI

Mercato energetico
Da "Economia e ambiente":
Ferrarini A., Il filo rosso che lega economia e ambiente, anno XVII, n.6, novembre-dicembre 1998, 14-18.

Molesti R., Esternalità e calcolo economico, anno XVII, n. 1-2, gennaio-aprile 1998, pp. 3-6.

Nebbia G., Fatti economici e fenomeni biologici, anno XVII, n. 6, novembre-dicembre 1998, pp. 9-13.

Da "IAEA Bulletin":
Seitz R., Finding common ground. Assessing wastes from fuel chains of electricity generation, n. 41, gennaio 1999, pp. 35-42.

Da "TuttoScienze", allegato de "La Stampa":
Grassia L., Fare industria secondo natura, 9 giugno 1999.

Da "Le scienze":
Gibbons J.H., Blair P.D., Gwin H.L., Strategie per l'energia, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 23-28.

Regge T., Facciamo i conti in tasca all'energia pulita, n. 363, novembre 1998,
pp. 9.

Deborah Sessano

Repetto R., La contabilità delle risorse ambientali, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 63-69.

Da "Statistics in focus.Energy and industry":
Eurostat, Statistical aspects of the energy economy in 1997, n. 22, 1998.

Eurostat, Electricity statistics. Provisional data for 1997, n. 6, 1998.

Da "21mo secolo. Scienza e tecnologia":
Caccia Dominioni F., La situazione internazionale e le nuove tendenze tecnologiche, n.2, luglio 1999, pp. 26-31.

Fornaciari P., L'Italia entra in Europa senza energia, n.3, ottobre 1999, pp. 33-35.

CERN ed Energy Amplifier
Da "CERN Courier" (versione inglese):
Anonimo, The Energy Amplifier: Carlo Rubbia's solution to world energy demand, CERN Courier, vol.35, n. 3, May 1995, pp. 15-19.

Da "TuttoScienze", allegato de "La Stampa":
Battiston R., Il Nobel Rubbia fa il tifo per il torio, 1 dicembre 1993.
Bianucci P., Rubbia: eccovi l'atomo pulito, 14 dicembre 1994.

Buono S., Rubbia: cosa farò da grande, 31 marzo 1999.

Da "Newton":
Buono S., La pattumiera atomica, n. 10, ottobre 1999, pp. 142-157.

Energia nucleare
Da "TuttoScienze", allegato de "La Stampa":
Bianucci P., Regge: eppure il nucleare serve, 1 ottobre 1999.

Regge T., Centrali russe, spada di Damocle, 3 marzo 1999.

Da "21mo secolo. Scienza e tecnologia":
Anonimo, L'energia nucleare rimane insostituibile anche per l'Italia, Intervista a Ugo Spezia, in "21mo secolo. Scienza e tecnologia", anno X, n.4, dicembre 1999, pp. 26-35.

Fornaciari P., Il futuro dell'energia nucleare nell'Europa occidentale, n.2, luglio 1999, pp. 22.

Fornaciari P., L'incidente nucleare in Giappone, n.3, ottobre 1999, pp. 30-32.

Gaspari A., Un libro a favore delle centrali nucleari, n.2, luglio 1999, pp. 25.

Deborah Sessano

Vitagliano G., Le centrali nucleari, n.2, luglio 1999, pp. 32-35.

Fonti fossili e rinnovabili

Da "Economia delle fonti di energia e dell'ambiente":
De Paoli L., Lorenzoni A., Gli strumenti di sostegno alle fonti rinnovabili: analisi metodologica e alcuni suggerimenti operativi, vol. XLI, n. 2, giugno 1998, pp. 201-222.

Gullì F., Condizioni normative e scelta tecnologica nella cogenerazione industriale: un modello di valutazione economica, vol. XXXIX, n. 3, dicembre 1996, pp. 91-137.

Da "Focus":
Bordieri F., Ma non dicevano che stava per finire? , n. 86, dicembre 1999, pp. 208-212.

Bignami L. (a cura di), Dossier. Quale energia?, n. 90, aprile 2000, pp. 180-188.

Da "TuttoScienze", allegato de "La Stampa":
Massaglia S., Dal Sole l'energia del prossimo secolo, 30 dicembre 1998.

Ravizza V., L'Italia scopre il solare, 24 febbraio 1999.

Da "Le scienze":
Garozzo M., Le fonti rinnovabili di energia, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 2-11.

Garozzo M., Le fonti rinnovabili in Italia e il ruolo dell'ENEA, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 92-95.

Hall D.O., House J., La biomassa come combustibile moderno, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 67-74.

Hoagland W., Energia solare, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 47-50.

Moretti P.M., Divone L.V., Le macchine eoliche, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 54-59.

Da "Newton":
Dicorato G., Energia solare ai frutti di bosco, n. 10, ottobre 1999, pp. 12.

Da "21mo secolo. Scienza e tecnologia":
Pedrocchi E., Energie rinnovabili, ambiente e nucleare, n.2, luglio 1999, pp. 24.

Vitagliano G., Centrali turbogas ed energie alternative, n. 3, ottobre 1999, pp.36-38.

Deborah Sessano

Politiche energetiche ed ambientali

Da "Economia delle fonti di energia e dell'ambiente":
Amedei P., Le conferenze sui cambiamenti climatici: da Rio de Janeiro a Kyoto, vol. XL, n. 3, settembre 1997, pp. 4-7.

Coiante D., Lombard P. L., Molocchi A., Alternative energetiche per un'Italia sostenibile, vol. XLI, n. 1, aprile 1998, pp. 139-171.

Pesaro G., Accordi volontari per i nuovi obiettivi di politica energetica e ambientale, vol. XLI, n. 3, settembre 1998, pp. 195-216.

Tosato G., Contaldi M., Ciorba U., Giansante C., Rancan A., Quantified greenhouse gas emission limitation and reduction objectives within specified time frames, vol. XL, n. 2, giugno 1997, pp. 141-176.
Vaccà S., Istituzioni e strumenti nel governo dell'ambiente, vol. XLI, n.1, aprile 1998, pp. 5-12.

Vaccà S., La sfida e gli obiettivi della politica energetica in Italia, vol. XXXIX, n. 3, dicembre 1996, pp. 5-19.

Viguier L., Economies in transition in the Kyoto protocol negotiating process, vol. XL, n. 3, settembre 1997, pp. 7-22.

Da "IAEA Bulletin":
Hirschberg S., Strupczewski A., How acceptable? Comparison of accident risks in different energy systems, n. 41, gennaio 1999, pp. 25-30.

Matsuki Y., Lee R., Deciding the way. Comparing different energy risks: methodology and issues, n. 41, gennaio 1999, pp. 10-14.

Priddle R., Energy and sustainable development, n. 41, gennaio 1999, pp. 2-6.

Strupczewski A., Benefits & Burdens. Comparative assessments of emissions from energy systems, n. 41, gennaio 1999, pp. 19-24.

Wilson R., Holland M., Rabl A., Dreicer M., The meaning of results. Comparative risk assessments of energy options, n. 41, gennaio 1999, pp. 14-18.

Da "La recherche":
Triendl R., L'environnement, enjeu diplomatique majeur, n. 313, octobre 1998, pp.77-79.

Da "Le scienze":
Bhagwati J., L'opportunità del libero scambio, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 82-87.

Bongaarts J., Crescita demografica e produzione alimentare, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 22-29.

Deborah Sessano

Charlson R.J., Wigley T.M., Attività umana e cambiamenti climatici, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 30-38.

Daly H.E., I pericoli del libero scambio, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 89-95.

Grove R.H., Le origini dell'ambientalismo occidentale, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 7-13.

Homer-Dixon T.F., Boutwell J.H., Rathjens G.W., Scarsità, degrado ambientale e conflitti, in "Risorse ambientali", Ruffolo, G.(a cura di), n.90, collana Quaderni, giugno 1996, pp. 47-54.
Silvestrini G., Possibili strategie per ridurre le emissioni di gas-serra, n.363, novembre 1998, pp. 78-84.

R&S
Da "CERN Courier" (versione inglese):
Bryant P., Precision beams for hadron therapy, vol. 38, n.7, October 1998, pp. 20-21.

Llewellyn Smith C., The public and particle physics, vol. 38, n. 7, October 1998, pp. 38.

Da "Courrier CERN" (versione francese):
Maiani L., Comment diriger un laboratoire mondial dans un cadre européen?, vol. 39, n. 2, marzo 1999, pp. 46.

Da "Economia delle fonti di energia e dell'ambiente":
Del Furia L., Fontana M., Lorenzi A., Conclusion of the Italian contribution to the ExternE research programme, vol. XLI, n. 1, aprile 1998, pp. 41-48.

Da "La recherche":
Chevalier G., Naissance d'un système de recherche, n. 313, octobre 1998, pp. 80-83.

Francis C. B., Mot d'ordre: essaimage tous azimuts, n. 313, octobre 1998, pp. 68-76.

Postel-Vinay O., La reforme de la science chinoise, n. 313, octobre 1998, pp. 52-65.
Da "Le scienze":
Appleby A.J., Il futuro delle celle a combustibile, n. 373, settembre 1999, pp. 84-91.
Caira M., Cumo M., Naviglio A., Sorabella L., MARS: un reattore per la seconda era nucleare, n. 368, aprile 1999, pp. 56-62.

Coiante D., Uno sguardo al futuro dell'energia, in "Energia pulite", Garozzo M. (a cura di), n.96, collana Quaderni, giugno 1997, pp. 20-22.

Lloyd A.C., Una centrale elettrica in cantina, n. 373, settembre 1999, pp. 92-97.

Regge T., Cari colleghi, diamoci da fare, n.373, settembre 1999, pp. 5.

Deborah Sessano

Da "21mo secolo. Scienza e tecnologia":
De Santis S., Scienza e media: il gran rifiuto, n.1, marzo 2000, pp.27-31.

ELENCO DEI SITI INTERNET

Mercato energetico
GALILEONET
Giuliani A., Quanto costa l'inquinamento. Intervista a Edgardo Curcio, anno III, n.10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

Marazzi M., Investire sul futuro. Intervista a Sergio Garribba, anno III, n.10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

Sereni V., "Nessuna semplice ricetta". Intervista a Umberto Colombo, anno III, n. 10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

IEA
International Energy Agency
Anonimo, Oil supply prospects, http://www.iea.or/g8/world/oilsup.htm

Anonimo, Fuels used for power generation, http://www.iea.or/g8/world/fuels.htm

IEA, Key world energy statistics from the IEA. 1998 Edition, http://www.iea.org/stats/files/keystats/stats_98.htm

IEA, Memorandum. Oil price trends, 2 dicembre 1999, http://www.iea.org/pub.htm

IEA, Monthly electricity survey. August 1999, http://www.iea.org/pub.htm

IEA, Monthly oil survey. November 1999, http://www.iea.org/pub.htm

IEA, The OECD's energy in charts and graphs, http://www.iea.org/stats/files/selstats/oenprode.htm
Paffenbarger J., Despite increasing refinery power production, oil-fired generation is declining, http://www.iea.org/pub.htm

Paffenbarger J., et al., Results from the OECD report on international projections of electricity generating costs, Atti della conferenza International Joint Power Generation Conference and Exhibition, 24-26 agosto 1998, http://www.iea.org/pub.htm

Priddle R., "We understand the current difficulties of oil-producing countries, but we can never commend cartelization". Interview, July 3 1999, http://www.iea.org/pub.htm

VARI
Parks G.T., Nuclear engineering and the future of electricity generation, http://www.newscientist.com/nsplus/insight/future/parks.html.old

THE VIRTUAL NUCLEAR TOURIST
Anonimo, Cost Comparison for Nuclear vs. Coal, http://www.cannonet.net/~gonyeau/nuclear/costs.htm

Anonimo, Comparison of various Energy Sources, http://www.cannon.net/~gonyeau/nuclear/why.htm

CERN ed Energy Amplifier
ADS WEBSITE
Pooley D., STC Chairman, Opinion of the Scientific and Technical Committee (STC) on a nuclear energy amplifier, European Commission nuclear science and technology, http://itumagill.fzk.de/ADS/ pooley.html

ATSE
The Australian Academy of Technological Sciences and Engineering
Boldeman J.W., Accelerator driven nuclear energy systems, in Atti dell'Academy Symposium, November 1997, http://www.atse.org.au/ publications/symposia/proc-1997p11.htm

CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
Anonimo, Accelerator application, http://www.cern.ch/Public/ ACCELERATORS/applications.html

Anonimo, Carlo Rubbia, http://www.cern.ch/Public/ACHIEVMENTS/ rubbia.html

ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Anonimo, Programma ADS, http://www.enea.it/ads/programma.html
Anonimo, Risorse per il programma ADS, http://www.enea.it/ads/risorse.html

Zirilli S., Conferenza "Accelerator Driven Sub-critical System 5-6 April !999", Ambasciata d'Italia a Pechino, Ufficio Scientifico, http://eserep.sede.enea.it/iembchina/S&T_Rubbia.html

GALILEONET
Leonardi A., Polemiche nucleari, Rubbia risponde, 5 dicembre 1998, http://www.galileonet.it/archivio/index.html

Leonardi A., Rubbia: "Il mio nucleare pulito", 5 dicembre 1998, http://www.galileonet.it/archivio/index.html

Deborah Sessano

Rubbia C., L'atomo che piace ai verdi, anno III, n.10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/archivio/index.html

INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION
Salvini G., Presentazione del volume: Italia al CERN, http://missions.itu.int/~italy/cern/cap110.htm

LAESA
Laboratorio del Amplificador de Energia
Anonimo, Anteproyecto del Prototipo Amplificador de Energia, http://www.laesa.com/Anteproyecto_PAE.html

Anonimo, El Amplificador de Energia, http://www.laesa.com/ampli.html

Anonimo, El Laboratorio, http://www.laesa.com/labo2.html

Anonimo, Estudios, http://www.laesa.com/estudios.html

Anonimo, Introducciòn, http://www.laesa.com/intro.html

Anonimo, Laesa, http://www.laesa.com/laesainfo.html

Anonimo, Noticias, http: //www.laesa.com/news.html

Anonimo, Trasmutacion, http://www.laesa.com/trasmutacion.html

LETTERE TRISETINE
Amati D., L'ultima "trovata" di Rubbia, gennaio 1996, http://www.spin.it/lettere-triestine/ rubbia.html

SENATO ITALIANO
Anonimo, Seguito dell'indagine conoscitiva sulle organizzazioni internazionali con particolare riferimento al ruolo e alla presenza dell'Italia: audizione del Direttore generale del centro europeo per la ricerca nucleare (CERN), http://www.senato.it/notes/ODG_PUBL/ 1dae6.htm

VARI
Rubbia C., Energia: un "male" necessario?, Dieci Nobel per il futuro, Edizione 1996, http://www.smau.it/nobel/ita/bio/f_rubbia.htm

Energia nucleare
ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Anonimo, Energia nucleare, http://www.enea.it/chiave_energianucleare.htm

Deborah Sessano

IAEA
International Atomic Energy Agency
ElBaradei M., The Future of Nuclear Power: Looking Ahead, Address at the Japan Atomic Industrial Forum, April 1999, http://www.iaea.org/worldatom/inforesource/dgspeeches/elbaradei/ebsp1999n005.html

IAEA, Convention on Nuclear Safety, http://www.iaea.or.at/worldatom/glance/legal/nukesafety.html

IAEA, Information Circular. Convention on Nuclear Safety, July 1994, http://www.iaea.or.at/worldatom/glance/legal/inf449.html

IAEA, Nuclear Power Status in 1998, April 1999, http://www.iaea.org/worldatom/Press/P_release/1999/prn0499.shtml

NEA
OECD Nuclear Energy Agency
Anonimo, Physics of Plutonium Recycling. Introduction, http://nea.fr/html/science/wppr/intro.htm

Stevens G.H., Summary of remarks at Global' 97, http://www.nea.fr/html/ndd/scenarios/scenarios.html

OECD NEA, Nuclear power and climate change, http://www.nea.fr/html/ndd/climate/climate.pdf

Fonti fossili e rinnovabili
GALILEONET
Silvestrini G., Il tempo della transizione. Fonti rinnovabili, anno III, n. 10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/ archivio/index.html

LETTERE TRIESTINE
Costa G., Metano e GPL restano insostituibili, gennaio 1996, http://www.spin.it/lettere-triestine/gpl.html

Politiche economiche ed ambientali
COMMISSIONE EUROPEA
Caccia Dominioni F., Discorso del Dott. Fabrizio Caccia Dominioni Direttore alla Commissione Europea, Seconda conferenza per l'energia, Torino, ottobre, 1997, http://europa.eu.int/en/comm/dg17/s97004c.htm

Caccia Dominioni F., Speech to the European Commission, European Commission, Aachen 13 May 1997 . Sito Internet: http://europa.eu.int/en/comm/dg/s97001c.htm.

Rothe M., Relazione sulla comunicazione della Commissione dal titolo "Energia per il futuro: le fonti energetiche rinnovabili - Libro Verde per una strategia comunitaria", Parlamento Europeo, 12 maggio 1997. Sito Internet: http://europa.eu.int/dg1/a4/it/a4-97/a4-0168.htm.

ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Anonimo, Energia e ambiente post-Kyoto: bilanci e scenari, http://www.enea.it/chiave_energia.htm

Anonimo, Obiettivo tematico 5: rifiuti radioattivi e sicurezza nucleare, in sezione Piano Annuale, http://www.enea.it/

GALILEONET
Clò A., La rivoluzione elettrica, anno III, n.10, settembre/ottobre 1998, http://www.galileonet.it/archivio/index.html

IEA
International Energy Agency
IEA, Nuclear power: sustainability, climate change and competition, October 1998, http://www.iea.org/energy.htm

Priddle R., The new millenium - New challenges for world energy, November 1999, http://www.iea.org/pub.htm

INFN
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Landau Network - Centro Volta, Politiche e strategie energetiche per il futuro: aspetti scientifici, tecnologici ed economici, Volume 1, settembre 1998, in I Rapporti, http://www.mi.infn.it/~landnet/rapporti1.html

VARI
Anonimo, Economy - Energy - Entropy, Atti della Europhysics Study Conference on energy and the environment, 10-13 May 1995, CERN, Geneva, http://epswww.epfl.ch/ene/ene_apr95_eurocryst_text.html

Hasselberger J., Introduction, The Joseph Hasselberger page of Economy, Physics and New Energy, http://www.ikaro.com/Hasselberger/intro.htm

R&S
ADS WEBSITE
Lung M., Reactors coupled with accelerators, Institute for Transuranic Elements, http://itumagill.fzk.de/ADS/mlungACC.htm

CERN
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire
Anonimo, Spin-offs in our daily life, http://www.cern.ch/Public/TECHNOLOGY/dailylife.html

Llewellyn Smith C. H., What's the use of basic science, http://www.cern.ch/Public/DI/useofbasicscience/usebasescience.htm

CHARLES UNIVERSITY - PRAGUE
Zindelova M., Science = Obsession…, Forum, vol. 1, n. 2, 1995, http://www.cuni.cz/forum/foruma/portret.html.en

ENEA
Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente
Anonimo, Carlo Rubbia nominato Presidente dell'ENEA, ENEA News, http://www.sede.enea.it/

KTH
Kungl Tekniska Hogskolan
Anonimo, Accelerator Driven Systems - An introduction, http://www.neutron.kth.se/transmutation/introduction

MURST
Ministero dell'Università e della Ricerca Scientifica e Tecnologica
Ufficio Stampa, Il ministro Zecchino nomina i componenti del Comitato di Indirizzo e Valutazione sulla Ricerca (CIVR) e il Comitato Esperti per la Politica della Ricerca (CEPR), 25 febbraio 1999, http://www.murst.it/ comunica/1999/0225m1.htm

UIC
Uranium Information Centre
Anonimo, Accelerator-driven Nuclear Energy, Nuclear Issues Briefing Paper 47, 1998, http://www.uic.com.au/ nip47.htm

Deborah Sessano