



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA MECCANICA
NUCLEARE E DELLA PRODUZIONE

I Veri Costi dell'Energia Nucleare

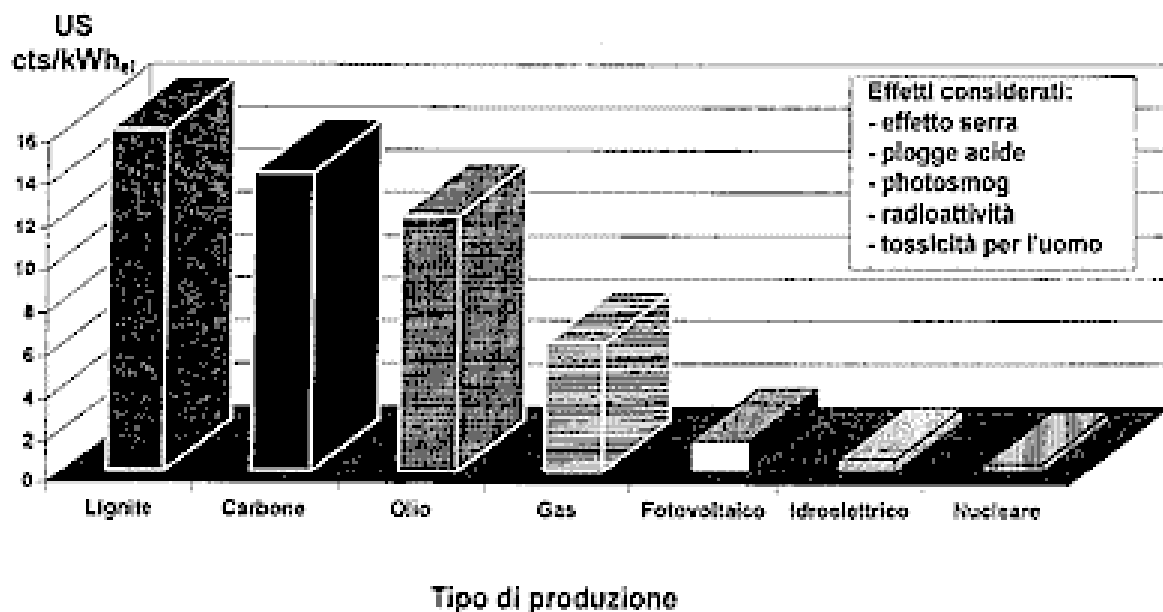
**V. Romanello
G. Lomonaco
N. Cerullo**

NT 1127(2006)



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

I Veri Costi dell'Energia Nucleare



V. Romanello¹, G. Lomonaco², N. Cerullo³

Pisa, Novembre 2006

NT 1127(2006)

¹ Dottorando in Ingegneria dei Materiali presso l'Università di Lecce

² Dottorando in Energetica Elettrica e Termica presso l'Università di Pisa

³ Già ordinario di "Reattori Nucleari Avanzati" presso l'Università di Genova ed attualmente professore incaricato presso le Università di Pisa e di Genova

Considerazioni preliminari

Fin dalla loro nascita, i reattori nucleari per uso industriale sono stati sottoposti ad una serie di critiche. Alcune di queste prendevano origine dal timore che una politica nucleare avrebbe comportato un regime con servizi di sicurezza molto più strutturati, a scapito di una richiesta di libertà totale. Pertanto, gli antinucleari (vedi per esempio l'americano Ralph Nader) non potendo direttamente esternare i loro timori, hanno sempre giustificato la loro avversione politica con argomentazioni tecniche in continua variazione. Si è iniziato con la sicurezza ("il reattore può diventare una bomba"); sfatata questa minaccia, si è detto che il costo dell'energia prodotta per via nucleare era molto più alto di quello dell'energia prodotta per via convenzionale. Ciò avveniva quando il petrolio costava 12 \$ al barile. E non era vero. Dopo che il petrolio ha viaggiato verso gli 80 \$ al barile si ripetono, rafforzate, le stesse cose. Sembra quindi opportuno affrontare questo argomento e dimostrare, sulla base delle cifre, la falsità di questa affermazione.

Attualmente, l'incremento della richiesta energetica in Italia e più in generale nel mondo ha largamente superato le previsioni. Tutto lascia presumere che tale trend continuerà immutato anche tenendo conto della crescente richiesta da parte dei paesi in via di sviluppo.

Se si guarda alle possibili fonti di energia attualmente e nel prossimo futuro disponibili, esse sono condizionate da almeno tre importanti fattori:

- la disponibilità
- l'economicità
- l'impatto ambientale

In realtà anche questo, come tutti i problemi complessi, non è semplicemente scindibile in sottoproblemi completamente indipendenti l'uno dall'altro. Ad esempio quantificare quale sia la reale disponibilità di una certa fonte energetica è funzione sia dei costi economici ritenuti "accettabili" per il suo approvvigionamento sia di quelli (di tipo diverso) relativi all'impatto ambientale. D'altro canto, non è possibile stimare quale sia il reale costo di una fonte energetica senza considerare sia la sua disponibilità (soprattutto in rapporto a quella delle altre possibili fonti) sia gli eventuali costi necessari per contenere entro limiti accettabili il suo impatto ambientale.

Per ciò che concerne le risorse energetiche primarie in Italia, gran parte della nostra produzione di energia elettrica è (e sarà sempre di più) legata all'importazione di fonti di energia, se non direttamente di elettricità, dall'estero.

Infatti, le nostre risorse, quali:

- il (relativamente poco) petrolio presente in Basilicata⁴,
- l'energia ottenibile sfruttando la fonte idroelettrica⁵,
- quella ottenibile sfruttando il Sole⁶,
- il vento⁷,

non riuscirebbero, anche nella migliore delle ipotesi, a coprire neanche la metà⁸ del nostro fabbisogno energetico.

Ne consegue che l'Italia importa e dovrà importare grandi quantità di petrolio e di gas naturale da paesi ad alto rischio di instabilità politica (Algeria, Medio Oriente) ed una considerevole quantità di energia elettrica dalla Francia (dove viene prodotta per lo più utilizzando centrali nucleari); tale quantità di energia elettrica è così elevata da superare la capacità di trasporto delle linee presenti fra Italia e Francia, cosicché una parte di essa viene importata attraverso la Svizzera, dovendo ovviamente sopportare un non trascurabile aggravio dei costi causato sia al pagamento dei diritti sia che alle aumentate perdite lungo la linea. Ciononostante, tale scelta risulta comunque conveniente!

Alla luce di queste considerazioni, è doveroso valutare brevemente la reale situazione energetica italiana. Il primo elemento che balza agli occhi è il prezzo dell'energia elettrica per l'industria: i dati (pur relativi a qualche anno fa) illustrati in tab. 1 sono francamente preoccupanti (e negli ultimi anni sono ulteriormente peggiorati a causa dell'aumento dei costi delle fonti fossili).

	Costo normalizzato del kWh all'industria	Differenza % rispetto alla Media UE
Italia	160	+ 60 %
Germania	118	+ 18 %
Regno Unito	112	+ 12 %
Spagna	109	+ 9 %
Francia	82	- 18 %
Svezia	58	- 42 %
Media UE	100	-

Tabella 1 – Costo normalizzato dell'energia elettrica all'industria negli anni 1999/2000 [7]

Particolarmente interessante è il confronto fra la situazione italiana e quella della Francia, paese che, per cultura, tradizione, condizioni climatiche, disponibilità di fonti energetiche primarie,

⁴ La cui estrazione avrebbe comunque un impatto ambientale non ancora del tutto quantificato in una zona ad alto valore naturalistico

⁵ Copre all'incirca il 20% del fabbisogno nazionale ma che ha ormai raggiunto in Italia pressoché il massimo del suo potenziale sfruttamento e che in termini di pericolosità (Vajont) e di impatto ambientale su zone vastissime (diga di Assuan) non è così "pulita" come potrebbe sembrare

⁶ Con costi, soprattutto per produzioni su scala medio-grande, che sono di un ordine di grandezza più elevati di quelli di tutte le altre fonti

⁷ Sul cui impatto ambientale in termini di inquinamento acustico, impatto paesaggistico e pericolosità per i volatili è in corso un acceso dibattito

⁸ Per grandissima parte grazie all'idroelettrico "tradizionale"

presenza di una grande azienda nazionale per la produzione e la distribuzione dell'elettricità⁹, è più degli altri assimilabile al nostro. Il costo dell'energia per l'industria italiana è pari praticamente al doppio di quello sostenuto dalle analoghe industrie transalpine: è ovvio come tale sovrapprezzo si ripercuota negativamente sulla competitività delle nostre aziende nazionali in un mercato sempre più globalizzato.

Ultima, ma non meno importante, è la questione ambientale. Circa i 4/5 dell'attuale produzione energetica italiana è ottenuta bruciando petrolio, gas naturale e (in misura minore) carbone: tutte e tre le fonti emettono nell'atmosfera massicce quantità di CO₂ e di altri inquinanti cancerogeni. Anche lo stesso gas metano, tante volte pubblicizzato come una fonte energetica "pulita", emette nell'atmosfera non solo CO₂ ma soprattutto, a causa delle perdite durante l'estrazione ed il trasporto, considerevoli quantità di CH₄; quest'ultimo, ai fini del famigerato effetto serra (se si accetta la sua esistenza e la sua sostanziale antropogenicità), presenta un GWP¹⁰ (*Global Warming Potential*) pari a 21¹¹. Attualmente l'unica fonte in grado di produrre una rilevante quantità del nostro fabbisogno energetico senza l'emissione in atmosfera di CO₂ e di altri gas dannosi è quella nucleare. Per un paese come l'Italia non solo firmatario, ma anche strenuo sostenitore del protocollo di Kyoto e delle successive analoghe iniziative, è imprescindibile porsi il problema di come produrre l'energia elettrica sufficiente al proprio fabbisogno riducendo le attuali quantità di gas serra emessi nell'atmosfera.

Da queste considerazioni discende che, nel prossimo futuro, l'Italia non potrà fare a meno dell'energia nucleare. A questo punto la classe politica dovrà rivedere le sue avventate decisioni prese sulla base di una presunta volontà popolare e non periodicamente riesaminate come pur previsto nel decreto di chiusura delle centrali nucleari.

Un esame obbiettivo degli effetti sull'ambiente e sulla salute della popolazione degli attuali impianti convenzionali per la produzione di energia, porta, come risultato, la quantificazione di una serie di danni ben superiore a quelli conseguenti a qualsiasi ipotizzabile incidente nucleare. Lo stesso incidente di Chernobyl, assunto come "esempio illuminante" per dimostrare il "drammatico" impatto di un incidente nucleare, ha totalizzato (ad un esame ufficiale e realistico effettuato nel 1996 dalla IAEA [17]) un numero limitato di vittime (64 morti), quasi tutti per cause immediate e meccaniche e, nel lungo periodo, una limitatissima (se non addirittura opinabile) variazione nella statistica delle malattie oncologiche. Tutto ciò prescindendo dalla singolarità sia del tipo del reattore¹² sia delle cause che hanno provocato l'incidente¹³.

⁹ EDF in Francia ed ENEL in Italia

¹⁰ Tale valore rappresenta il rapporto fra il riscaldamento globale in un dato lasso di tempo (ad es. 100 anni) dovuto alla sostanza in esame ed il riscaldamento dovuto al biossido di carbonio nella medesima quantità

¹¹ Ovvero è 21 volte più nocivo dell'anidride carbonica rispetto all'effetto serra

¹² Assolutamente privo dei normali dispositivi di sicurezza e di contenimento presenti nei reattori occidentali

¹³ Per effettuare un non meditato esperimento, sono state effettuate delle manovre assolutamente vietate dalle procedure operative

Comunque, l'effettiva validità tecnica e le positive caratteristiche in termini di impatto ambientale di una determinata tecnologia, se rappresentano sicuramente requisiti fondamentali per il successo della stessa, non sono però sufficienti a giustificarne l'uso. E' necessario infatti che il costo del prodotto ottenuto sia se non vantaggioso, per lo meno accettabile rispetto allo stesso ottenuto con altre tecnologie. Questo è sicuramente vero anche per la produzione elettronucleare dell'energia.

In questa prospettiva tenteremo in seguito di valutare il costo del kWh prodotto per via nucleare, analizzando le diverse componenti e confrontandolo, infine, con l'analogo costo del kWh prodotto da diverse fonti.

Si è seguita una procedura forse un po' laboriosa, ma necessaria per consentire una verifica dei risultati ottenuti.

Criteri di valutazione generale dei costi

Seguendo una procedura consolidata, per prima cosa si devono considerare i costi fissi di impianto, che, nel caso di produzione elettronucleare, hanno una incidenza particolarmente elevata sul costo del prodotto finale. La valutazione di tali costi comprende:

- il costo nominale della centrale
- il suo tempo di realizzazione
- il tasso di interesse
- la durata della vita operativa prevista
- i fattori di disponibilità e carico
- i costi per lo smantellamento (comprese la custodia in sicurezza delle scorie) ed il recupero del sito

Naturalmente gran parte di queste voci sono presenti nei capitoli di spesa anche di altri tipi di impianto. Per gli impianti nucleari, però, esse sono particolarmente elevate, soprattutto per la rigorosa applicazione delle particolari norme di sicurezza e della garanzia della qualità, da sempre caratteristiche di questa tecnologia. Ad esempio a poter incidere molto significativamente sui costi può contribuire il tempo di realizzazione della centrale: è necessario quindi che la qualificazione del sito, particolarmente lunga e complessa per gli impianti nucleari, sia rapida. A tale scopo il nostro Paese potrebbe vantaggiosamente utilizzare le aree già qualificate a tale scopo.

Altro costo legato alla produzione elettronucleare dell'energia riguarda il ciclo del combustibile, in questo caso molto meno gravoso rispetto alle fonti fossili.

Esso comprende le varie fasi della complessa lavorazione del combustibile stesso, fino allo smaltimento sicuro delle scorie in siti geologicamente stabili.

L'insieme dei costi da considerare sono quindi:

a) quelli di produzione, suddivisibili in:

- costi fissi:
 - o di investimento
 - o di esercizio e manutenzione
 - o assicurazioni e tasse fisse
- costi variabili:
 - o relativi al consumo di combustibile
 - o di esercizio e manutenzione
 - o assicurazioni e tasse variabili

b) quelli di costo dell'impianto, suddivisibili in:

- diretti:
 - o acquisto area e sistemazione del sito
 - o opere civili
 - o isola nucleare
 - o gruppo turboalternatore
 - o impianto elettrico
 - o attrezzature ausiliari di centrale
 - o dotazione iniziale parti di ricambio
- indiretti:
 - o ottenimento autorizzazioni
 - o supervisione e spese generali di costruzione
 - o imprevisti
 - o addestramento personale
 - o prove di avviamento
 - o revisione prezzi
 - o interessi, imposte e tasse durante la costruzione

c) costo del combustibile (per impianto PWR¹⁴)

- estrazione del minerale
- purificazione dell'uranio
- conversione in esafluoruro
- arricchimento
- riconversione in ossido
- fabbricazione degli elementi di combustibile

¹⁴ Naturalmente trattasi di un ciclo particolare che differisce nel caso di reattori di tipo diverso

- trasporto ed immagazzinamento
- bruciamento
- decadimento in piscina del combustibile irraggiato
- trasporto del combustibile irraggiato
- trattamento del combustibile irraggiato con eventuale recupero di uranio e plutonio
- immagazzinamento e smaltimento sicuro

c) costi di esercizio e manutenzione:

- personale di esercizio ed amministrativo
- attività di ispezione
- riparazioni e sostituzioni di componenti
- acquisto di materiali di consumo
- etc.

d) costi di smantellamento e recupero del sito: viene inserita nel costo del kWh una voce apposita, che attualizzata al momento dello smantellamento fornisca le risorse finanziarie necessarie per riportare il sito alla situazione di cosiddetto “prato verde” (*greenfield*).

Costo dell’Energia Prodotta

Costi di Impianto

Il costo c_i dell’energia elettrica prodotta [1] per la parte riguardante i costi di impianto sarà dato dal costo K_a dello stesso attualizzato all’inizio dell’esercizio commerciale, moltiplicato per il fattore di annualità¹⁵ x e fratto la quantità di energia prodotta in un anno E_p :

$$c_i = \frac{xK_a}{E_p} = \frac{xK_a}{8760 \cdot f_c \cdot We} \quad (1)$$

dove f_c rappresenta il fattore di carico (definito come il rapporto fra la quantità di energia elettrica prodotta effettivamente entro l’anno e quella che sarebbe stata prodotta se l’impianto avesse funzionato alla massima potenza per tutte le 8760 ore annuali); We la potenza elettrica netta dell’impianto, in kilowatt (energia prodotta in un anno: $E_p = 8760 \cdot f_c \cdot We$).

Il fattore di annualità sarà dato dalle quote per interessi (x_1) e per l’ammortamento (x_2):

$$x = x_1 + x_2 = x_1 + \frac{x_1}{(1+x_1)^n - 1} \quad (2)$$

Da una serie di complesse considerazioni possiamo porre $K_a = (1,1 \div 1,2) \cdot K_n$ (dove K_n è il costo nominale), in base al tempo di costruzione T , all’interesse annuo, alla distribuzione temporale delle spese, etc.

¹⁵ Il fattore di annualità rappresenta quel numero che moltiplicato per il costo dell’investimento fornisce il costo annuo relativo alle spese fisse

Avremo allora:

costo nominale: $K_n = 1\,400 \text{ €/kW}^{16} \cdot 10^6 \text{ kW} = 1,4 \cdot 10^9 \text{ €}$ [3]

tempo di costruzione¹⁷: $T = 5$ anni

tasso di interesse: $x_I = 5\%$ ¹⁸

durata esercizio¹⁹: $n = 40$ anni

fattore medio di carico²⁰: $f_c = 0,7$

e sarà:

$K_a = 1,4 \cdot K_n = 1,68 \cdot 10^9 \text{ €}$

$x = 0,058$

e quindi, applicando la (1) ad un impianto da $1\,000 \text{ MW}_e$ si otterrà:

$$c_i = \frac{0,058 \cdot 1,68 \cdot 10^9}{8760 \cdot 0,7 \cdot 10^6} = 0,016$$

ovvero, $c_i = 1,6$ eurocents/kWh.

Tale valutazione è (come evidenziato nelle conclusioni) senz'altro cautelativa (anche perché si immagina il capitale sia interamente finanziato, ossia totale assenza di capitale proprio).

Costo del ciclo del combustibile

Come già detto si parla di costo del ciclo di combustibile. L'incidenza sul costo sarà data dal rapporto fra i costi relativi agli oneri finanziari ed all'accantonamento per il successivo trattamento e l'energia prodotta. Se indichiamo con C_c il costo del combustibile fresco e con n_c il numero di anni in cui esso raggiunge il previsto burnup²¹, il rateo annuale relativo sarà:

$$R_c = C_c \left[x_I + \frac{x_I}{(1+x_I)^{n_c} - 1} \right] \quad (3)$$

che comporterà un onere finanziario paria a:

$$S_c = n_c R_c \quad (4)$$

L'energia prodotta sarà:

$$E_p = 24b\eta \quad (5)^{22}$$

con b burnup medio allo scarico, in kWd/kg, ed η rendimento dell'impianto. L'incidenza dei costi di trattamento (c_t) e riutilizzo (c_r) saranno:

¹⁶ Il costo di un impianto moderno (tipo ABWR o AP-600) può oscillare fra $1\,200$ e $1\,500 \text{ €/kW}_{\text{inst}}$ [9], ma per ordini multipli tali cifre possono scendere a $1\,000 \text{ €/kW}_{\text{inst}}$

¹⁷ Attualmente si pensa di costruire gli impianti di nuova generazione in tempi inferiori ai 5 anni, che rappresenta quindi una stima cautelativa

¹⁸ La stima è oggi realistica, e rappresenta il valore adoperato generalmente per questo tipo di calcoli. Si veda ad esempio [6, 19]

¹⁹ Si stima che le attuali centrali possano funzionare anche fino a 60 anni

²⁰ Il fattore medio di carico per le attuali centrali è in realtà superiore a tale valore

²¹ Il burnup rappresenta quel parametro che indica la quantità di energia totale prodotta (MWd) per unità di massa del combustibile utilizzato (tonnellata) e varia a seconda del tipo di reattore

$$c_t = \frac{C_t}{E_p} \quad (6)$$

$$c_r = \frac{C_r}{E_p} \quad (7)$$

Facendo riferimento allora nuovamente ad una centrale PWR da 1'000 MW_e, e ponendo:

$$x_1 = 5\%$$

$$b = 33'000 \text{ kWh/kg}^{23}$$

$$n_c = 3 \text{ anni}$$

$$\eta = 0,3^{24}$$

essendo $C_c = 1'620 \text{ €/kgU}^{25}$, abbiamo:

$$R_c = 594,88 \text{ €/kg anno}$$

$$S_c = 1'785 \text{ €/kg}$$

$$C_c = S_c/E_p$$

L'energia prodotta:

$$E_p = 2,1 \cdot 10^5 \text{ kWh/kg}$$

Essendo:

$C_t = 521,0 \text{ €/kg}$, e $C_r = -98,5 \text{ €/kg}$, sarà:

$$C_{cc} = \frac{c_c + c_t + c_r}{E_p} = \frac{1785 + 521,10 - 98,65}{24 \cdot 33000 \cdot 0,33} =$$

$$0,85 \text{ eurocents/kWh}$$

Ricordiamo che in tale computo è stato considerato lo stoccaggio in *cask* o riprocessamento. Alcune fonti peraltro indicano costi più bassi di quelli riportati [6].

La soluzione svedese infatti, che contempla lo smaltimento sicuro in siti geologicamente stabili in *cask* in rame ed acciaio con caratteristiche durevoli nel tempo [12], richiede costi di smaltimento [13, 14] dell'ordine di 0,01 SEK²⁶/kWh (pari a circa 0,1 eurocents/kWh).

Si noti che se il prezzo indicato dell'uranio triplicasse, da facili calcoli si otterrebbe un costo totale del ciclo del combustibile pari a solo 1,32 eurocent/kWh²⁷.

Costi esercizio e manutenzione

²² Il 24 rappresenta il fattore di conversione da kWd (kilowatt-day) a kWh, unità di misura dell'energia prodotta

²³ Per gli attuali impianti il burnup è superiore

²⁴ Per gli attuali impianti il rendimento è superiore

²⁵ In realtà tale valore, dato il favorevole valore del cambio euro/dollaro, è sensibilmente inferiore – quindi la stima, ancora una volta – assai cautelativa

²⁶ SEK: corone svedesi

²⁷ Si noti che nell'aprile 2006 il prezzo dell'U₃O₈ era pari a 90,20 \$/kg x 8 kg (necessari per ottenere 1 kg di combustibile) = 722 \$ = 564 € (1 € = 1,28 \$). Triplicando tale prezzo di otterrebbe quindi un prezzo del combustibile pari a $C_c = 2'748 \text{ €/kgU}$

Coinvolge varie voci: retribuzioni del personale, manutenzioni ordinaria e straordinaria, materiali di consumo, oneri assicurativi, licenze, etc. Assumendo un valore orientativo di 0,5 eurocents/kWh [1, 3, 10] si avrebbe, per la tipologia di impianto considerato, un onere di oltre 30 milioni di euro all'anno:

$$8760 \left[\frac{h}{anno} \right] \cdot 0,7 [fatt.util.] \cdot 10^6 [kW] \cdot 0,005 \left[\frac{euro}{kW} \right] =$$

$$= 30\,660\,000 \left[\frac{euro}{anno} \right]$$

Costi di smantellamento e recupero del sito

Al contrario di molti altri settori della tecnologia, in campo nucleare ci si pone da subito il problema dello smantellamento dell'impianto. Pur essendo tale costo fortemente variabile, e mancando valutazioni precise, si pensa [1] che questo si aggiri fra il 20% ed il 40% del costo attualizzato dell'impianto. Possiamo porre quindi $c_{sm} = 0,05$ eurocents/kWh [10]. Si noti che l'accantonamento di tale cifra costituirebbe un capitale, dopo 40 anni all'interesse annuo del 5% (considerando un reinvestimento annuo di $3\,066\,000 \text{ €}^{28}$), pari a oltre 370 milioni di euro (pari a circa il 26% del costo dell'impianto). Se poi l'impianto fosse esercito per 60 anni l'accantonamento ammonterebbe ad oltre un $1\,084\,000\,000$ (un miliardo e ottantaquattro milioni) di euro, pari ad oltre il 77% del costo dell'impianto!

Prudenzialmente negli USA le *utilities* stanno accantonando circa 0,1 centesimi(\$)/kWh (si calcola che il massimo prezzo di smantellamento sia dell'ordine²⁹ di 430 €/kW_e [11]). Si noti il caso del reattore di Fort St. Vrain, reattore del tipo HTGR da 330 MW_e, decommissionato al costo di 196 milioni di dollari (quindi a meno 1 centesimo/kWh nonostante abbia funzionato per soli 16 anni!).

Costo complessivo

Dalle considerazioni sopra riportate risulta che il costo totale del kWh prodotto per via nucleare è:

$$c_t = c_i + c_c + c_{em} + c_{sm} = 1,6 + 0,85 + 0,5 + 0,05 = \mathbf{3,0} \text{ eurocents/kWh}$$

Dall'esame dei singoli addendi risulta la seguente ripartizione:

- 53,33% costo di investimento

$$^{28} 365 \left[\frac{giorni}{anno} \right] \cdot 24 \left[\frac{ore}{giorno} \right] \cdot 0,7 \cdot 10^6 [kW] \cdot \frac{0,05}{100} \left[\frac{\text{€}}{kWh} \right] =$$

$$= 3\,066\,000 \text{ [€/anno]}$$

²⁹ Secondo le indicazioni fornite dalla OECD

- 28,33% costo del ciclo di combustibile (di cui circa il 6% dovuto all'acquisto dell'uranio vero e proprio)
- 16,67% costo di esercizio e manutenzione
- 1,67% costo dello smantellamento e recupero del sito

Si nota subito che i costi dell'intero ciclo del combustibile influiscono poco più di 1/4. Peraltro, come già detto, il costo per l'acquisto dell'uranio naturale incide appena del 6% circa: questo implica che anche un raddoppio del prezzo del combustibile, peraltro improbabile data la provenienza dello stesso da diverse parti del mondo (per lo più aree politicamente stabili) e la possibilità di accantonarne in piccoli spazi notevoli quantità³⁰, non inciderebbe significativamente sul prezzo dell'energia prodotta; dai calcoli si osserva facilmente che **una triplicazione del prezzo dell'uranio porterebbe il costo del kWh nucleare da un costo di 3,0 a 3,48 eurocents/kWh, pari appena ad un aumento del 16%! Inoltre verrebbero minimizzati gli esborsi verso l'estero di valuta pregiata (come avviene nel caso di produzione elettrica per mezzo del carbone o, ancora peggio, dei prodotti petroliferi), con conseguenti inevitabili effetti benefici sulla bilancia commerciale. Risulta chiaro infatti che la maggior parte del costo risulta dalla realizzazione dell'impianto, ovvero risorse finanziarie che rimangono nel nostro Paese (e che promuovono la movimentazione dei capitali); in altri termini l'opzione nucleare consentirebbe di ottenere vantaggi di tipo:**

- *microeconomico*: il costo del kWh nucleare sarebbe fra i più bassi possibili;
- *macroeconomico*: miglioramento dell'equilibrio energetico del Paese, riduzione dell'impatto ambientale e progressiva riduzione della fattura energetica pagata all'estero, spostamento sul territorio nazionale del baricentro della spesa energetica, rilancio dello spin-off tecnologico tipico dei comparti ad alta tecnologia [4].

Notiamo altresì, come già evidenziato nelle note, che il calcolo effettuato è cautelativo, e si riferisce per lo più ad impianti di vecchia generazione. Oggi infatti gli impianti vengono realizzati in 4 anni, (addirittura la Westinghouse assicura un periodo di 36 mesi dal primo getto di calcestruzzo all'avvio commerciale dell'impianto). Inoltre l'impiego di codici di calcolo sempre più efficienti e l'esperienza operativa hanno dimostrato la possibilità di estendere la vita degli impianti a 60 anni. Infine, lo studio di nuovi tipi di combustibile potrebbe portare il burnup a 60'000 MWd/t, mentre i rendimenti dei nuovi impianti di attestano al 37% (EPR), ed i costi di impianto possono scendere a 1'000 €/kW per ordini multipli. Prendendo in considerazione le ipotesi migliorative prima esposte, si otterrebbe un costo più realistico dell'ordine di **1,90 eurocents/kWh**. Si consideri che tale valutazione riguarda i reattori ad acqua. Comunque bisogna

³⁰ È necessario tener conto del fatto che 1 g di U²³⁵ fornisce una quantità di energia pari a circa 80 GJ, ovvero la stessa energia di circa 2'000 tonnellate di petrolio

tener conto del fatto che sono in avanzata fase di progettazione e *licensing* i reattori a gas ad alta temperatura [8] (che fanno parte della IV Generazione), che, con il loro rendimento vicino al 50%, i minori costi nominali d'impianto, i più elevati burnup (fino a 800'000 MWd/t), potrebbero diminuire drasticamente persino questo valore.

Vengono di seguito riportati, a scopo esemplificativo, alcuni grafici (figg. 1÷6) in cui viene illustrato il confronto fra i prezzi delle diverse fonti in rapporto al costo del kWh nucleare.

In fig. 1 sono rappresentati i costi di produzione elettrica (in dollari per MWh) dalle diverse fonti: appare subito evidente che le fonti più economiche sono rappresentate dal carbone e dal nucleare (e si nota come l'energia eolica costi oltre il 64% in più, quella solare addirittura il 198% in più).

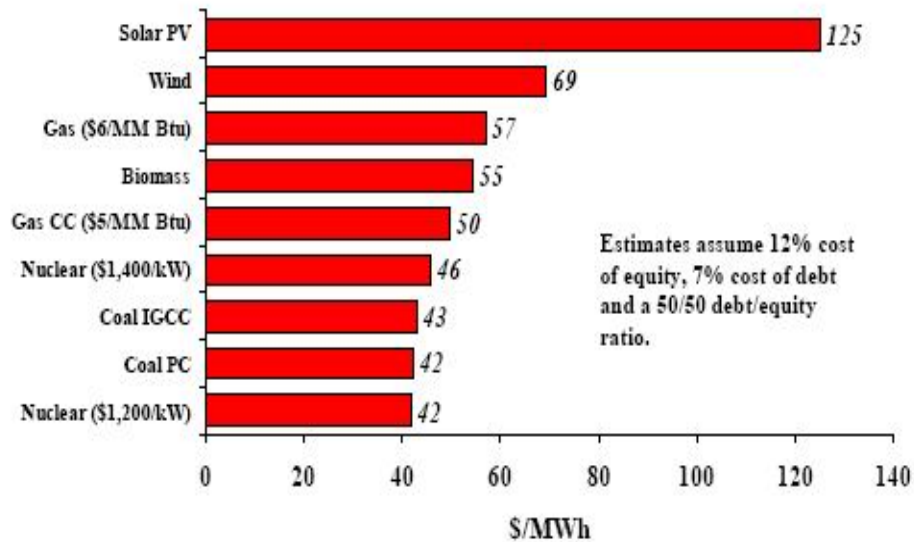
In fig. 2 si riporta la drammatica incidenza del prezzo del gas naturale sul costo del kWh prodotto, e viene messo in evidenza come questo diventi facilmente anticompetitivo con la fonte nucleare. Analoga è la situazione per il petrolio.

La fig. 3 riporta l'impatto del prezzo del combustibile (ed in particolare del suo aumento) sul costo finale del kWh prodotto: ancora una volta risulta evidente l'estrema sensibilità della bolletta elettrica all'aumento del prezzo del gas (ed al contrario della sostanziale insensibilità della fonte nucleare).

In figura 4 sono riportati i prezzi di produzione elettrica dalle diverse fonti negli USA negli anni 1981÷2001: è evidente che il nucleare assieme al carbone hanno rappresentato di gran lunga le fonti più economiche (specialmente negli ultimi anni, che hanno visto una crescente domanda dei prodotti petroliferi col loro conseguente rapido aumento del prezzo).

La fig. 5 infine chiarisce quale sia la quota del costo dalle diverse fonti legata all'investimento, ai costi operativi ed al combustibile; appare chiaramente la ridotta incidenza dei costi del combustibile per la fonte elettronucleare (la maggioranza del costo, come sopra dimostrato, deriva dai costi di investimento).

New Power Plants: Comparison of Power Costs



Notes:
 Electricity cost from wind energy does not include wind energy tax credit
 \$/MMBtu refers to cost of natural gas
 \$/kW refers to the overnight capital cost of new nuclear plants

Figura 1 – Costi (in \$/MWh) per le diverse fonti [6]

Rising Gas Prices = Dramatic Impact on Electricity Cost

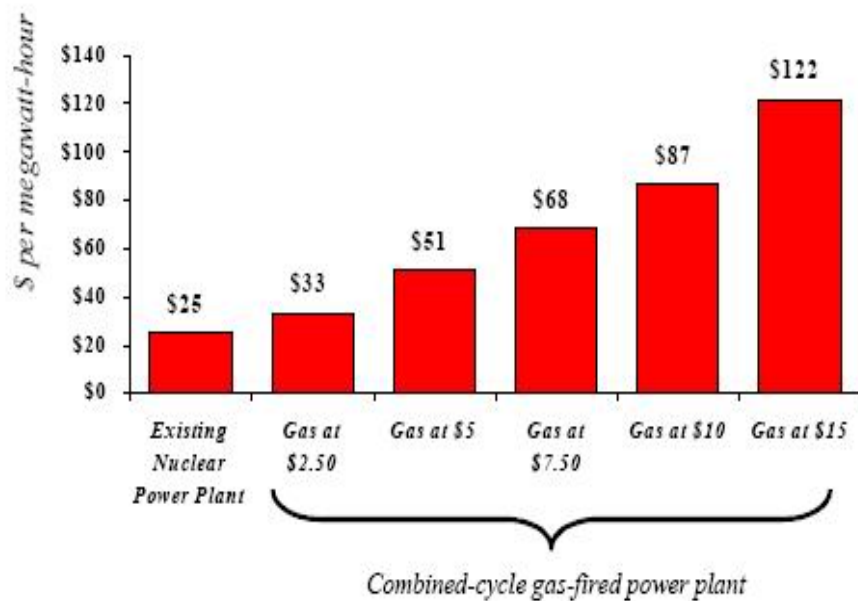


Figura 2 – Impatto del prezzo del gas naturale sul costo dell'energia elettrica [5]

The impact of fuel costs on electricity generation costs. Finland, early 2000

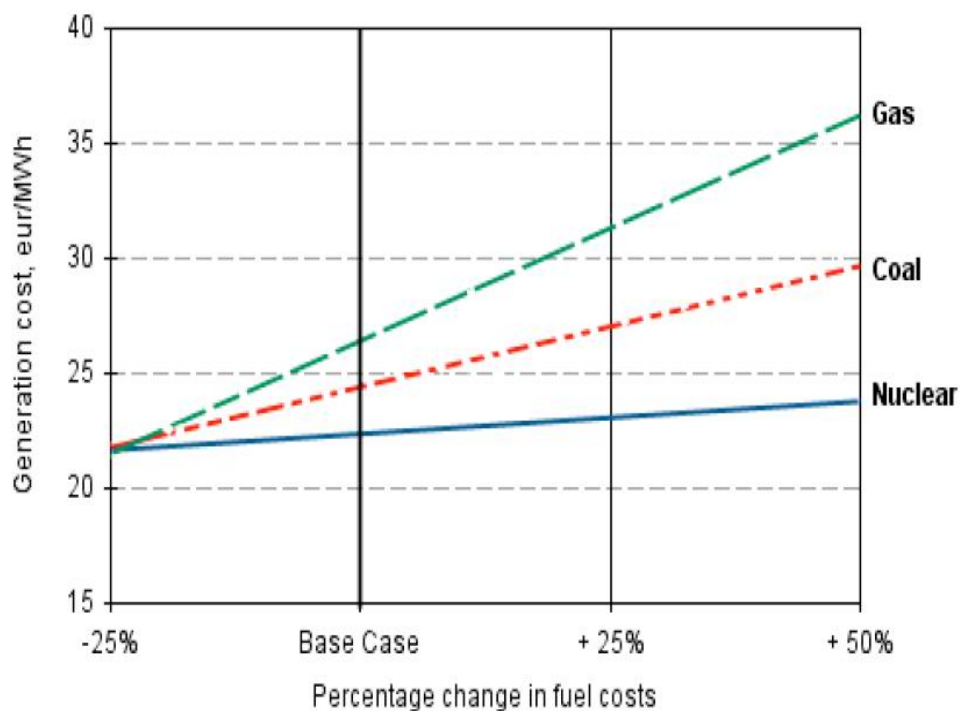


Figura 3 – Impatto dell'aumento del prezzo del combustibile per le diverse fonti [6]³¹ riferito all'anno 2000

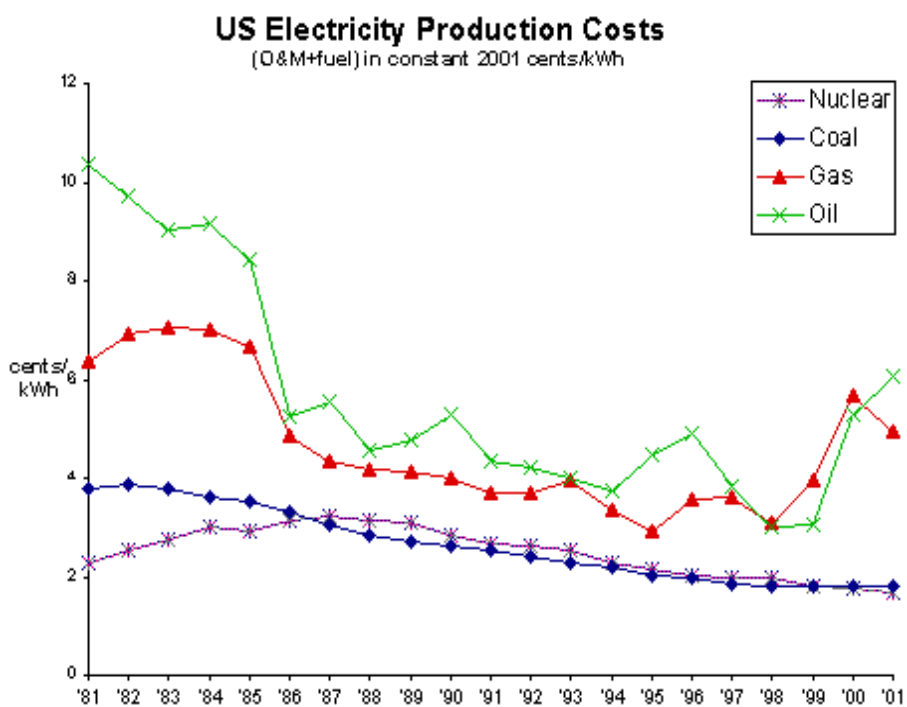


Figura 4 – Confronto del prezzo dell'energia elettrica da diverse fonti negli ultimi anni [6]

³¹ Si noti che il pareggio fra i costi per le varie fonti non si ha nel caso base ma ipotizzando una irrealistica riduzione di un quarto dei costi

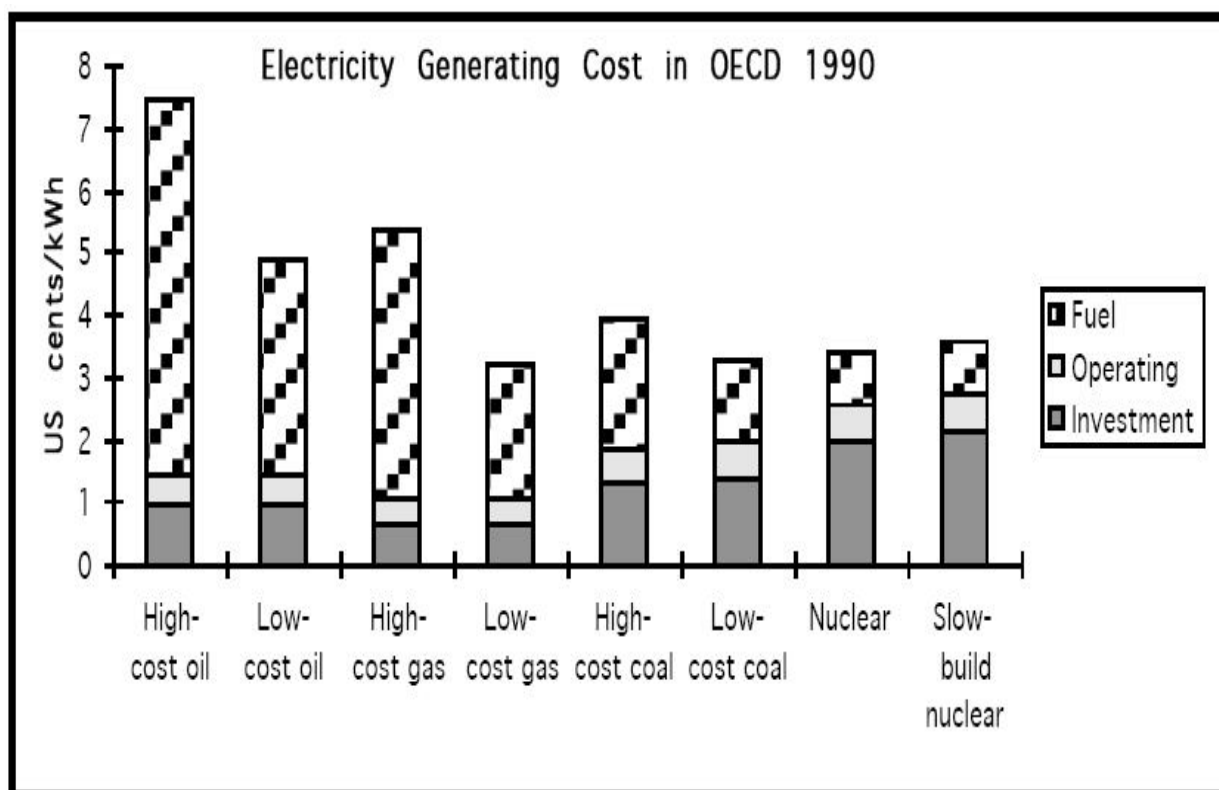


Figura 5 – Impatto delle diverse voci di costo sul prezzo finale dell'energia elettrica nei Paesi OECD [6]

Si noti infine che la trattazione seguita prende in considerazione uno scenario a *tassi agevolati*³² (ovvero il finanziamento avviene al 100% con capitale proprio al tasso del 5% e l'impresa non è soggetta a tassazione e quindi le aliquote IRES³³ e IRAP³⁴ sono poste pari a zero).

Gli scenari a tassi agevolati e di mercato infatti presentano valori del LUEC³⁵ sensibilmente differenti: rispettivamente, 25,91 e 47,73 €/MWh (per un ottimo approfondimento sull'argomento si veda [15]). Emerge chiaramente il ruolo chiave della modalità di finanziamento e del regime fiscale applicato; si rileva comunque che in entrambi i casi il costo dell'opzione nucleare risulta essere più conveniente rispetto ai cicli combinati (prendendo a riferimento per questi ultimi un costo pari a 67 €/MWh). E' utile notare inoltre la riduzione dei costi per *effetti di scala* (dato l'aumento della competenza progettuale e realizzativa³⁶) e per l'effetto della costruzione di più unità sullo stesso sito (si stimano risparmi medi dell'ordine del 15%, da sommare a quelli derivanti dai fattori di scala).

³² Un finanziamento a tasso agevolato potrebbe essere a carico di organismi pubblici, motivato da logiche di pubblico interesse. In tale situazione il soggetto pubblico potrebbe stabilire un tasso di interesse opportunamente basso, non influenzato da intenti speculativi. Un investimento a tassi di mercato invece verrebbe finanziato come un qualsiasi progetto industriale sviluppato da investitori privati, in parte con capitale proprio ed in parte con capitale di debito. Per approfondimenti si veda rif. [15]

³³ IRES: Imposta sul REddito delle Società

³⁴ IRAP: Imposta Regionale sulle Attività Produttive

³⁵ LUEC: *Levelised Unit Electricity Cost*, ossia Costo Unitario di Produzione

³⁶ Vale la regola secondo cui ogni raddoppio del numero di impianti porta ad una diminuzione del costo di costruzione del 5%

Conclusioni

Come si è visto nel corso della trattazione è emerso che il costo dell'energia elettrica prodotta per via nucleare si aggirerà, anche adottando le ipotesi più pessimistiche, attorno ai 3 eurocents/kWh. Ricordiamo che il costo medio di generazione dell'energia in Italia si è aggirato nel I trimestre del 2005 sui 6,88 eurocents/kWh [2], per un costo totale³⁷ di oltre 10 eurocent/kWh.

Del resto il prezzo del barile di petrolio ha raggiunto la soglia degli 80 \$/barile³⁸, quadruplicando il suo prezzo negli ultimi dieci anni (e superando quindi il massimo storico³⁹ di 75,6 \$/barile del 1980 in occasione della guerra Iran-Iraq⁴⁰ [16]) . Fatto questo sicuramente molto penalizzante per il nostro Paese, poiché l'Italia dipende all'82% dalle importazioni dall'estero, e, come già detto, in media il prezzo dell'energia elettrica è ben più elevato rispetto alla media europea, proprio a causa di un eccessivo sbilanciamento verso i combustibili più costosi in assoluto e passibili di pericolosi rialzi (petrolio e gas naturale). Un rapido aumento del prezzo delle fonti fossili porta inevitabilmente ad un sensibile aumento del prezzo dell'energia così prodotta, dal momento che la maggiore spesa si ha proprio nell'acquisto dei combustibili; viceversa l'uranio viene oggi estratto da giacimenti molto concentrati a 20 \$/kg. Le riserve così accertate ammontano a 4,4 milioni di tonnellate; ma pagandolo 170 \$/kg si hanno a disposizione 145 milioni di tonnellate. A 1'000 \$/kg si potrebbe estrarre uranio dall'acqua del mare (dove ci sono 20 miliardi di tonnellate di uranio), anche in questo ipotetico caso il prezzo resterebbe paragonabile a quello delle fonti fossili [3]. Sicuramente subiamo oggi, fatti alla mano, il frutto delle dissenate scelte in termini di politica energetica attuate negli ultimi 15 anni, soprattutto sotto la spinta dei presunti movimenti ecologisti (che in passato, quando il petrolio costava attorno ai 15 dollari a barile hanno sostenuto che, oltretutto, la fonte nucleare fosse anche antieconomica; anche quando il barile è arrivato alla soglia degli 80 \$ hanno continuato a dire la stessa cosa!).

Dalle considerazioni sopra riportate, risulta evidente la convenienza dell'opzione nucleare. E' pertanto improcrastinabile una pianificazione energetica nel nostro Paese, che contempli una adeguata diversificazione delle fonti, fra le quali il ricorso all'energia nucleare con reattori di IV generazione [18]; diversamente corriamo il serio rischio di "rimanere al buio ed al freddo" in un futuro non troppo lontano e di non raggiungere mai quella competitività da ogni parte politica

³⁷ Il costo totale naturalmente differisce dal costo di generazione in quanto include tutte le altre voci (tasse, oneri, etc.)

³⁸ 1 barile = 42 galloni, ovvero circa 159 litri

³⁹ Attualizzato ai giorni nostri

⁴⁰ Subendo quindi un aumento dal 1998, quando il prezzo era di 11 \$/barile, del 709%!

indicata come indispensabile per non soccombere. Con buona pace, inoltre, degli obbiettivi di Kyoto dall'Italia particolarmente sponsorizzati.

Ringraziamenti

Si desidera ringraziare il Prof. S. Paci per la gentile e preziosa collaborazione prestata.

Bibliografia

- [1] “Appunti di impianti nucleari – parte I: aspetti generali” – Prof. B. Guerrini, Dr. Ing. S. Paci – SEU – 1999
- [2] Autorità per l’energia elettrica ed il gas – <http://www.autorita.energia.it/>
- [3] “La tabella permanente dell’energia”, Alceste Rilli – 21^{mo} Secolo – n. 2 Giugno 2003
- [4] “La crisi del sistema energetico italiano” – Conferenza Nucleare e Sostenibilità – U. Spezia – Pisa, 23 aprile 2005
- [5] “The outlook for Nuclear Energy in a Competitive Electricity Business” – NEI (Nuclear Energy Institute) – <http://www.nei.org>
- [6] “The economics of nuclear power” – Uranium Information Centre – February 2007 - <http://www.uic.com.au/nip08.htm>
- [7] “Quanto costa l’elettricità” – S. Manera – Quotidiano Nazionale, pag. 12 – 07 Ottobre 2002
- [8] “I reattori nucleari ad alta temperatura nella prospettiva energetica futura” – V. Romanello, N. Cerullo, G. Lomonaco – 21^{mo} Secolo – n. 2 Luglio 2004
- [9] “The Economics of Nuclear Power”, April 2006 – World Nuclear Association (WNA) – <http://www.world-nuclear.org/info/inf02.htm>
- [10] “Cost Comparison for Nuclear vs. Coal” – Virtual Nuclear Tourist – <http://www.nucleartourist.com/basics/costs.htm>
- [11] Uranium Institute Centre – <http://www.uic.com.au/nip13.htm>
- [12] “La sistemazione in sicurezza delle scorie nucleari” - V. Romanello, G. Lomonaco, N. Cerullo – 21^{mo} Secolo, n. 3 Luglio 2005
- [13] “Cost calculation for the swedish radioactive waste management system” – Maria Wikström – Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co., SKB – <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/wikstrom-tucson-98.pdf>
- [14] “Covering the expenses for nuclear waste – Financing” – SKI – http://www.ski.se/dynamaster/file_archive/010822/40666125312/financing.pdf
- [15] “Valutazione dei costi di produzione dell’energia elettrica da nucleare” – M. Gallanti, F. Parozzi – Agosto 2006 – Energia n. 3
- [16] “Petrolio: record storico prezzi, mai così alti in 25 anni” – Adnkronos – http://www.adnkronos.com/Speciali/Energia/NotizieManuali/01_150706.html
- [17] <http://www.iaea.org>
- [18] <http://gen-iv.ne.doe.gov>
- [19] “Nuclear Power: Least-Cost Option for Baseload Electricity in Finland” – R. Tarjanne, S. Rissanen - <http://www.world-nuclear.org/sym/2000/tarjanne.htm>