

## IL COSTO DELL'ENERGIA NUCLEARE, OVVERO COME SI FA DIVENTARE ULTRAECONOMICO IL COSTO DEL KWH

Domenico Coiante

Publicato su [www.aspoitalia.net](http://www.aspoitalia.net), 5 Maggio 2006

### Gli annunci dell'ultima ora

L'attuale crisi dei prezzi petroliferi è materia feconda per i sostenitori del ritorno al nucleare. Non passa giorno che il nuovo prezzo del Brent non venga commentato sui media italiani con l'auspicio della ripresa delle attività nucleari. Tra le numerose mirabilia che accompagnano i commenti, c'è l'argomento economico della convenienza del costo di produzione del kWh nucleare. Anzi, mentre l'Agenzia Internazionale dell'Energia nel suo rapporto annuale, World Energy Outlook 2005, valuta tale costo essenzialmente in linea con quello delle centrali termoelettriche convenzionali, cioè intorno a 6-7 eurocent/kWh (petrolio a 30 \$/barile), le stime più recenti presentate da numerosi giornali filonucleari sono arrivate ad affermare che il costo del kWh è all'incirca quello delle grandi centrali idroelettriche. Alessandro Clerici, presidente onorario del Comitato italiano della World Energy Conference, in un recente lavoro di rassegna sulla situazione energetica mondiale ha indicato il costo del kWh nucleare in 0.024 euro (Clerici A., 2005). In una recente trasmissione televisiva, condotta da Piero Angela, nella quale si esaminava la questione energetica italiana, è stata mostrata una tabella dei costi di produzione del kWh dalla varie fonti in cui brillava per convenienza proprio il nucleare con un valore pari a circa 3 eurocent a kWh messo a confronto con i 35 centesimi del kWh fotovoltaico. Quindi, si lascia apparire come evidente il fatto che sembra pura follia continuare ad insistere sulla moratoria nucleare in Italia visto il combinato disposto tra la convenienza economica dell'elettricità prodotta con questa fonte e l'alto prezzo del petrolio ormai situato sopra quota 70 \$ a barile.

Premesso che già il costo indicato dalla IEA come competitivo è fortemente criticabile perché esso non tiene conto delle spese di smantellamento delle centrali e della conservazione in discarica delle scorie radioattive per migliaia di anni, viene spontaneo di chiedersi: - Come è possibile che nel corso di pochi mesi il costo di produzione dell'energia nucleare si sia addirittura dimezzato?

E' legge economica generale il fatto che l'aumento del prezzo del petrolio porti con sé un generale aumento del costo del lavoro e quindi un aumento del costo di tutti gli impianti, compresi quelli nucleari. Evidentemente però devono esserci stati importanti improvvisi miglioramenti tecnologici che hanno aumentato l'efficienza di conversione delle centrali nucleari in modo da realizzare un tale abbassamento del costo del kWh. Sarà così?

Onestamente non so rispondere a questa domanda, perché a me è sfuggito completamente il verificarsi di questo break through tecnologico.

La mia conoscenza dell'argomento nucleare dal punto di vista economico era rimasta al fatto che la privatizzazione USA del settore, avvenuta nel 1978 a seguito degli accordi militari USA-URSS sul blocco degli armamenti nucleari, aveva tagliato le incentivazioni governative all'industria nucleare, che si esplicavano essenzialmente sotto forma di acquisto da parte del governo di tutto il plutonio contenuto negli elementi di combustibile bruciati, plutonio impiegato per le testate missilistiche nucleari. E' ormai un fatto storico che, da quel momento, con il prezzo del petrolio situato sui 15 \$/barile, il costo di produzione del kWh nucleare era divenuto non competitivo, tanto è vero che dal 1978 negli USA non è stato più fatto un ordine di centrale nucleare fino ad oggi. In quegli anni, uscì un libro scritto da Rubbia in cui veniva chiaramente indicata la non convenienza della tecnologia nucleare allora esistente senza il profitto aggiunto dalle ricadute economiche in

campo militare. In poche parole, il nucleare cosiddetto pacifico conveniva solo a chi voleva farsi la bomba atomica (vedi Francia, Pakistan, India, Cina e attualmente Iran).

Pertanto, a meno che qualcuno non mi dimostri che nel frattempo si è avuto un break through tecnologico significativo, sono portato a pensare che l'abbassamento del costo sia il frutto di qualche altro intervento. Escludo che si pensi di tornare a vendere il plutonio prodotto dalle nuove centrali per la fabbricazione delle bombe atomiche e, quindi, non mi rimane altra spiegazione che il ricorso a un'operazione, oggi di moda soprattutto in Italia, di finanza creativa.

Come vedremo, esaminando le informazioni che trapelano dai pochi progetti di realizzazione di nuove centrali, appare abbastanza chiaro che è proprio questa la ragione delle nuove stime al ribasso per il costo del kWh. Vediamo in dettaglio il marchingegno che è stato escogitato per far divenire, di punto in bianco, così conveniente il kWh nucleare.

## Il costo del kWh

Poiché le cifre ballano in modo notevole, conviene cercare di ricavarle in modo autonomo. Secondo il metodo consigliato dall'IEA (International Energy Agency) per eseguire queste stime, la spesa annuale sostenuta da una centrale elettrica può essere sintetizzata nella somma di due termini. Il primo è dovuto alla spesa finanziaria annuale per la restituzione del capitale ed il secondo è determinato dalla spesa annuale per il combustibile che alimenta la centrale. In modo semplificato possiamo scrivere:

$$SA = (FFT) * I + C_{sc} * (AEP)$$

Dove:

- SA è la spesa annuale sostenuta per la gestione della centrale.
- FFT è un fattore finanziario totale che determina il rateo annuale da pagare per la restituzione del capitale, I, durante l'intera vita operativa dell'impianto, capitale preso in prestito per la realizzazione dell'impianto "chiavi in mano".
- $C_{sc}$  è il costo specifico dovuto al combustibile, cioè il costo del combustibile per unità di energia prodotta.
- AEP è la quantità netta di energia elettrica prodotta e venduta dalla centrale.

Il primo termine della somma è detto anche costo fisso perché esso non dipende dalla produzione di energia, mentre il secondo è detto costo variabile perché esso è proporzionale alla quantità di energia prodotta.

Il fattore finanziario totale, FFT, è un parametro molto complicato che racchiude numerosi altri fattori, tra cui il tasso d'interesse reale del denaro preso in prestito, il tasso di preammortamento, le spese assicurative e quelle delle tasse, la spesa per l'esercizio e manutenzione della centrale, le spese per le parti di ricambio, la spesa per lo smantellamento e il valore recuperato a fine vita operativa.

Purtroppo, per avere un quadro preciso della situazione economica, occorre armarsi di pazienza ed entrare in dettagli circa le formule che determinano FFT. La sua espressione analitica è mostrata nella seguente espressione, la cui dimostrazione mi permetto di omettere per concisione. (Coloro che fossero interessati a tale dimostrazione possono trovarla nel terzo capitolo del volume "Le nuove fonti di energia rinnovabile", edito da Franco Angeli nel 2004 e da me scritto).

$$FFT = [Q_N * (1-T)^{-1} * (1-Tb/dQ_d)] * (B+K_R) + K_{O\&M} + (K_U - K_S) * Q_N$$

Dove:

- $Q_N$  è il fattore di annualità del prestito restituito in N rate annuali.
- T è il rateo delle tasse dirette, in Italia pari a circa 30%.

- $b$  è la frazione dell'investimento ammessa al deprezzamento, in genere pari al 50%.
- $d$  è il periodo riconosciuto per il deprezzamento, in genere per le centrali termoelettriche pari a 15 anni.
- $Q_d$  è il fattore di annualità per il valore recuperato dal deprezzamento.
- $B > 1$  è il fattore di maggiorazione del capitale dovuto al pagamento delle rate di preammortamento durante la fase di costruzione della centrale, alle spese assicurative della fase cantiere, ecc.
- $K_R$  è la frazione di spesa per le parti di ricambio riferita al valore dell'investimento iniziale.
- $K_{O\&M}$  è il costo annuale di esercizio e manutenzione della centrale rapportato all'investimento iniziale.
- $(K_U - K_S)$  rappresenta il differenziale di spesa dovuto al costo dello smantellamento degli impianti,  $K_U$ , e al ricavo ottenuto dal recupero di valore per la vendita delle parti d'impianto a fine vita operativa,  $K_S$ .

Il costo del kWh è definito come rapporto tra la spesa annuale sostenuta e l'energia annuale immessa in rete espressa in kWh, cioè  $(SA)/(AEP)$ :

$$C_{kWh} = (FFT) \cdot I / (AEP) + C_{sc}$$

A questo punto siamo in grado di calcolare da noi stessi il costo del kWh sia delle centrali termoelettriche che di quelle nucleari, una volta che siano noti i valori dei parametri che compaiono nella formula. Spostiamo quindi l'attenzione sulla determinazione del valore di ciascun parametro.

## 1- Energia annuale prodotta AEP

### a) Centrali termoelettriche a policomcombustibile.

Per la presente generazione, i dati di esercizio mostrano un valore che, nel caso migliore, è di circa 6600 kWh per ogni kW di potenza dell'impianto. Ciò corrisponde ad un fattore di capacità degli impianti pari a circa il 75%, ciò equivale a dire che la centrale in media produce energia come se lavorasse alla sua massima potenza per 6600 ore sulle 8760 ore annuali. In realtà le cose stanno un po' diversamente, perché, se si prendono i dati di esercizio annuale delle centrali dell'ENEL, si trova un fattore di capacità medio sperimentale notevolmente più basso, addirittura inferiore alle 5000 ore equivalenti. Tuttavia, poiché questo dato è mediato sull'intero parco di generatori, esso sconta il fatto della obsolescenza di una parte di essi. Pertanto, poiché faremo riferimento alle nuove centrali, assumeremo nel seguito il valore:

$$AEP_{ther} = 6600 \text{ kWh/kW}$$

### b) Centrali elettronucleari

Anche in questo caso i dati sperimentali di esercizio, rilevati sul parco molto vasto delle centrali dei paesi dell'OCSE, mostrano un valore medio più basso, all'incirca intorno ai 6000 kWh/kW (ENEA, Energia e Economia: Dati e statistiche di base 1993). Tuttavia, le centrali di più recente costruzione hanno una produttività media più alta, che si avvicina molto a quella delle nuove centrali termoelettriche. Ciò è perfettamente comprensibile se si considera il fatto che la produzione di elettricità, anche nel caso nucleare, si effettua per conversione termoelettrica mediante impianti termoidraulici del tutto simili a quelli delle centrali convenzionali. Cambia soltanto la fonte di calore e, quindi, assumendo che in entrambi i casi venga assicurata la continuità della fornitura di energia termica, l'affidabilità degli impianti a valle che trasformano questa energia in elettricità può essere considerata analoga. A fronte di queste considerazioni, fino ad oggi, poteva

venire considerata ragionevole una produttività media degli impianti nucleari nell'arco della loro vita pari a quella delle centrali termoelettriche, cioè intorno a 6600 kWh/kW.

Non devono trarre in inganno gli exploit, che di tanto in tanto vengono annunciati, di record di 7500-8000 kWh/kW, realizzati per uno o due anni quasi sempre da nuove centrali che entrano in esercizio. Tali record vengono registrati e subito dimenticati. Infatti, si sa bene che nell'esercizio di lungo periodo tali prestazioni eccezionali vengono riassorbite dalla routine, che deve fare i conti per le centrali nucleari con le lunghe fermate per il ricambio degli elementi di combustibile con frequenza all'incirca biennale.

Pertanto, poiché non risulta che l'affidabilità degli impianti nucleari abbia fatto un balzo in avanti tanto grande da superare le prestazioni delle centrali termoelettriche, considereremo come dato di produttività ancora valido quello:

$$AEP_{\text{nucl}} = 6600 \text{ kWh/kW}$$

## 2- Costo degli impianti

### a) Centrali termoelettriche

Il costo attuale delle centrali a policombustibile è chiaramente ricavabile dai listini di vendita e si aggira intorno ai 1000 euro/kW. Pertanto assumeremo per I il valore:

$$I_{\text{ther}} = 1000 \text{ euro/kW}$$

### b) Centrali elettronucleari

In questo caso risulta particolarmente difficile stabilire il costo attuale degli impianti, perché sui prezzi aleggiano sempre elementi di ambiguità, come in tutte le cose che riguardano il nucleare. Non è possibile far riferimento ad un preciso listino dei prezzi, perché esso non esiste. Il prezzo di ogni impianto risulta sempre da una trattativa riservata tra il fornitore e l'acquirente, in cui giocano sovente aspetti di carattere politico e la cui conclusione non è mai resa di pubblico dominio. Esiste poi una ulteriore aleatorietà nel fatto che il prezzo finale della centrale chiavi in mano è sempre molto diverso da quello dell'ordine a causa del costo aggiunto dal fattore tempo. Dall'ordine di acquisto all'entrata in esercizio il tempo si misura in circa 10 anni e in tale lasso temporale molte cifre possono cambiare. Per illustrare questi aspetti, farò riferimento a due casi recenti di cui si conoscono abbastanza bene i termini.

Nel 1995 è entrata in esercizio la sezione B della centrale inglese di Sizewell. I dati di spesa a consuntivo, rivalutati al 2003, sono stati di 3800 euro/kW (The Times del 27/7/1993).

Nel 2003 è iniziata la costruzione della centrale finlandese di Oikiluoto da 1600 MWe il cui costo è stato annunciato in 3 miliardi di euro (A. Clerici, 2005). Pertanto, a meno del solito lievitare dei prezzi durante i 6 anni di previsione per l'entrata in esercizio, il prezzo dell'impianto sarebbe di 1875 euro/kW. Il primo è un costo a consuntivo, mentre il secondo è un costo a preventivo. In definitiva potremo assumere come ragionevole un prezzo intermedio tra i due e cioè:

$$I_{\text{nucl}} = 2800 \text{ euro/kW}$$

Pressappoco allo stesso valore (2500 euro/kW) è pervenuta anche la ricerca effettuata da Massimo Ippolito, inviata come email nel sito del Forum sul Petrolio del 29/4/06.

## 3- Costo specifico dovuto al combustibile

Il contributo del costo dovuto al combustibile è ricavabile dalla seguente espressione:

$$C_{sc} = f_c / (H * E_s)$$

Dove:

$f_c$  è il prezzo specifico del combustibile in euro/kg.

$H$  è l'efficienza di conversione dell'energia contenuta nel combustibile in elettricità.

$E_s$  è l'energia specifica contenuta nel combustibile espressa in kWh/kg.

a) Centrali termoelettriche

Considerando l'olio minerale come combustibile per la centrale e con il prezzo attuale del petrolio a 70 \$/barile, si ha che  $f_c = 0.510$  \$/kg, cioè 0.425 euro/kg. L'efficienza attuale delle centrali termoelettriche si può considerare pari a  $H = 0.39$  e l'energia specifica  $E_s = 11.63$  kWh/kg. In definitiva pertanto si ha che il contributo al costo del kWh dovuto all'olio combustibile è:

$$C_{sc} = f_c / (H * E_s) = 0.094 \text{ euro/kWh}$$

b) Centrali elettronucleari

Il costo specifico dell'uranio minerale, che era stato stabile intorno agli 80 \$/kg per molti anni, dopo i recenti rincari, si trova oggi intorno ai 40-45 \$ alla libbra, cioè circa 100 \$/kg. Pertanto, se fosse possibile bruciare l'uranio come qualsiasi altro combustibile, potremo assumere  $f_c = 100$  \$/kg, cioè 83 euro/kg. Sappiamo però che ciò non è possibile, perché l'uranio naturale deve essere arricchito nel tenore del suo isotopo fissile almeno fino al 3-5% per poter essere bruciato nel reattore. Quindi il combustibile nucleare non è l'uranio naturale, ma quello arricchito. Il processo di arricchimento prevede la trasformazione del minerale in un composto gassoso, esafluoruro di uranio,  $UF_6$ , da cui con processi, o di diffusione gassosa selettiva, o con ultracentrifugazione, si ottiene l'arricchimento. L'esafluoruro di uranio arricchito viene infine trasformato in un composto solido, l'ossido di uranio arricchito, che finalmente può essere utilizzato in pellets come combustibile nel reattore. E' evidente che tutto questo processo è molto costoso e pertanto il costo del combustibile finale sarà molto più alto di quello dell'uranio naturale di partenza. Sempre facendo riferimento allo studio di Massimo Ippolito, il costo finale dell'uranio arricchito si aggira intorno a 2005 \$/kg, cioè 1671 euro/kg. Pertanto assumeremo questo dato come valore per  $f_c$ .

L'efficienza di trasformazione dell'energia termica sviluppata nel contenitore primario del reattore in energia elettrica finale risulta un po' più bassa di quella delle centrali termoelettriche a causa della necessaria presenza di uno scambiatore di calore tra circuito termico primario e quello secondario. In genere, perciò, si considera il dato sperimentale per l'efficienza come  $H = 0.33$  (contro 0.39 delle centrali termoelettriche).

Se l'uranio arricchito potesse essere bruciato tale e quale, come si brucia il petrolio, la sua energia specifica potrebbe essere ricavata dalla costante empirica degli ingegneri nucleari, che stabilisce il fatto che l'energia termica ottenibile da 1 kg di uranio arricchito al 3-5% mentre è in corso la reazione a catena è pari a 30 MW per le 24 ore giornaliere (Loizzo P., 1994). Ciò equivarrebbe, per i fini del processo di trasformazione termoelettrico, a considerare l'uranio come se fosse un combustibile avente altissima energia specifica termica dal valore  $E_s = 720$  MWh/kg, cioè 720000 kWh/kg. Pertanto, se applichiamo questo dato alla nostra formula precedente, otteniamo il valore del contributo al costo del kWh dovuto al combustibile nucleare come:

$$C_{sc} = 1671 / (0.33 * 720000) = 0.007 \text{ euro/kWh}$$

Tale valore appare trascurabile rispetto agli altri costi ed è proprio da qui che è nata la famosa leggenda messa in giro negli anni '50 del costo "tanto basso da non potersi calcolare". Si può anche vedere che per quanto possa aumentare il prezzo dell'uranio sopra al valore attuale di 83 euro/kg, il contributo al costo del kWh rimarrà ancora trascurabile per un grande intervallo perché quello che determina il costo finale sono le lavorazioni successive. Ma allora perché il nucleare non è stato più considerato competitivo dopo il 1978 senza i sussidi militari?

Purtroppo le aggiunte di costo non si fermano al processo di arricchimento e all'ossido di uranio. Infatti, l'uranio arricchito non può essere inserito nel reattore tale e quale come si fa col petrolio nel bruciatore. Occorre ancora procedere ad una serie di lavorazioni meccaniche raffinate con materiali molto costosi incapsulando l'uranio in una struttura sigillata e inossidabile fino ad arrivare ai veri "elementi di combustibile". Sono questi che devono essere considerati il "combustibile" del reattore e, pertanto, è il loro costo, rapportato alla quantità di uranio contenuta, che va posto nella formula precedente. Con mio rammarico, però, non posso andare oltre in questa stima perché il costo degli elementi di combustibile non mi è noto. Tuttavia, possiamo aggirare l'ostacolo attingendo direttamente il valore di  $C_{sc}$  dalla scomposizione del costo del kWh in costi fissi e costi variabili come è pubblicato nel rapporto già citato dell'IEA. Il valore nel 2004 era:

$$C_{sc} = 0.011 \text{ euro/kWh}$$

Come si può notare, questo valore (non aggiornato con gli attuali prezzi del petrolio), pur essendo notevolmente più basso di quello dell'olio minerale, risulta tuttavia ben superiore al costo sopra calcolato. Per quanto si è visto sopra, tale voce di costo dovrebbe risentire degli aumenti del petrolio soltanto per l'incidenza sul costo dei materiali e del lavoro per l'arricchimento e per gli elementi di combustibile, ma molto poco per gli aumenti del prezzo dell'uranio naturale.

#### 4- Il fattore finanziario totale

Ho lasciato per ultima l'analisi di questo fattore perché è proprio su di esso che sono possibili le maggiori manipolazioni di finanza creativa. Facendo riferimento alla sua espressione analitica, sopra riportata, si può vedere che in essa è presente il fattore di annualità,  $Q_N$ , la cui espressione contiene due importanti parametri: il tasso d'interesse reale,  $r$ , e il tempo della vita operativa della centrale,  $N$ , espresso in anni. Cioè:

$$Q_N = r/[1 - (1+r)^{-N}]$$

Questo fattore esprime la frazione di capitale che deve essere restituita ogni anno ai finanziatori dell'impresa per tutta la vita operativa della centrale considerata in  $N$  anni. Quindi  $Q_N$  dipende dal tasso d'interesse reale che si è concordato con il finanziatore e dalla durata della vita operativa. E' chiaro che agendo su questi due parametri è possibile far assumere a  $Q_N$  una vasta gamma di valori. Per rendersi conto di questo importante aspetto conviene far riferimento alla seguente tabella in cui vengono riportati i valori di  $Q_N$  in funzione di  $N$ , per tre diversi valori di  $r$  che riflettono le condizioni finanziarie attuali per gli investimenti in impianti energetici.

**Fattore di annualità in funzione della vita operativa degli impianti**

N (anni)	$Q_N$ (r = 4%)	$Q_N$ (r = 5%)	$Q_N$ (r = 6%)
15	0.08995	0.09634	0.10297
20	0.07358	0.08024	0.08718
30	0.05783	0.06505	0.07265
40	0.05052	0.05828	0.06646
50	0.04655	0.05478	0.06344

Occorre precisare che fino ad oggi, sia per le centrali termoelettriche, sia per quelle nucleari, veniva comunemente usato il tasso d'interesse reale del 5% per stabilire la rata annuale da restituire per l'investimento. Quindi la colonna centrale è quella che veniva presa in esame in relazione alla vita operativa prevista per gli impianti. Quest'ultima veniva considerata pari a 30 anni sia per le centrali termoelettriche che per quelle nucleari.

A proposito di quest'ultimo aspetto, posso testimoniare direttamente, per aver lavorato come analista per molti anni nel campo della sicurezza dei reattori nucleari presso il CNEN, l'organo tecnico governativo preposto ai controlli, che la vita operativa considerata sicura per le centrali ad acqua bollente e ad acqua pressurizzata era stabilita in 30 anni, durante i quali la legge prevede che la licenza di esercizio della centrale deve essere rinnovata ogni 10 anni dopo una revisione completa di tutti i sistemi rilevanti ai fini della sicurezza.

Pertanto, non esisteva dubbio che il valore del fattore di annualità da usare nei calcoli economici fosse quello relativo a  $N=30$  anni, cioè  $Q_{30} = 0.06505$  nel caso più frequente di  $r = 5\%$ , sia per le centrali termoelettriche che per quelle nucleari.

I valori di  $Q_N$  relativi a  $N = 40 - 50$  anni venivano considerati soltanto per i grandi impianti idroelettrici, la cui affidabilità era consolidata ormai dall'uso secolare.

Stando così le cose, abbiamo tutti gli elementi per calcolare il costo del kWh una volta che sia stato stabilito il valore degli altri parametri,  $B$ ,  $K_R$ ,  $K_{O\&M}$ ,  $K_U$ ,  $K_S$ .

#### a) Centrali termoelettriche

In questo caso la fase di cantiere copre circa 5-6 anni. Quindi il fattore di maggiorazione dei costi è quantificabile in un aumento complessivo del 20%. Cioè:  $B_{ther} = 1.2$

Durante la vita operativa, si considera che la frazione di capitale da dedicare ai ricambi sia pari al 15%, mentre la spesa annuale per esercizio e manutenzione viene considerata pari al 3% del capitale. Cioè:  $K_R = 0.15$ ;  $K_{O\&M} = 0.03$ .

Il valore recuperato a fine vita operativa può essere considerato all'incirca uguale alla spesa da sostenere per lo smantellamento dell'impianto, cioè:  $(K_U = K_S)$ .

Pertanto il valore del fattore finanziario per il termoelettrico sarà:

$$(FFT)_{ther} = 0.1424$$

#### b) Centrali elettronucleari

In questo caso, la fase di cantiere si protrae per almeno 10 anni e quindi il fattore di maggiorazione dei costi diviene:  $B_{nucl} = 1.3$ .

Anche per il nucleare si può assumere una frazione dell'investimento da dedicare ai ricambi pari al 15%, mentre la spesa per l'esercizio e la manutenzione deve essere considerata maggiore a causa di tutte le operazioni relative alle disposizioni per la sicurezza nucleare. Pertanto, sembra ragionevole considerare questi valori dei parametri:  $K_{Rnucl} = 0.15$ ;  $K_{O\&Mnucl} = 0.04$ .

Il valore recuperato a fine vita operativa deve essere considerato inferiore a quello delle centrali termoelettriche, soprattutto a causa del fatto che l'esposizione di parte dei materiali alle dosi neutroniche li rende attivati e quindi non più riciclabili a fine vita operativa. Pertanto, se per le centrali convenzionali si suppone di recuperare un quarto del valore, in questo caso la frazione recuperata sarà all'incirca del 15% dell'investimento. Invece il costo dello smantellamento e del trattamento dei rifiuti radioattivi, senza considerare la loro collocazione in discarica speciale, è da considerare molto alto. Tale costo viene stimato all'incirca pari a quello dell'investimento iniziale. In definitiva per le centrali nucleari si dovrebbe avere la seguente situazione:  $K_S = 0.15$ ;  $K_U = 1$ .

Il valore del fattore finanziario sarà:

$$(FFT)_{\text{nucl}} = 0.2161$$

## 5- Il costo del kWh

Siamo finalmente in grado di calcolare il costo del kWh nei due casi, andando a sostituire il valore dei parametri nell'espressione di  $C_{\text{kWh}}$ . Si ottiene:

### a) Centrali termoelettriche a policoncombustibile

$$C_{\text{kWh}} = (FFT)*I/(AEP) + C_{\text{sc}} = 0.022 + 0.094 = 0.116 \text{ euro/kWh}$$

Sul costo totale di 0.116 euro pesa per 0.022 euro il costo fisso di centrale e per 0.094 quello variabile dovuto al prezzo dell'olio minerale. Il valore così alto del costo variabile si spiega con il prezzo attuale del petrolio a 70 \$/barile.

### b) Centrali elettronucleari

$$C_{\text{kWh}} = (FFT)*I/(AEP) + C_{\text{sc}} = 0.092 + 0.011 = 0.103 \text{ euro/kWh}$$

In questo caso il costo fisso dovuto al capitale risulta preponderante sul costo variabile dovuto al combustibile (0.092 contro 0.011 euro).

In conclusione, fatte salve tutte le riserve collegate agli ulteriori costi per il waste disposal delle scorie radioattive e ai relativi problemi sociali, i nostri conteggi portano a dire che il livello attuale raggiunto dal prezzo del petrolio a 70 \$/barile ha prodotto l'innalzamento del costo del kWh termoelettrico dai 0.07 euro/kWh del passato recente (petrolio a 30 \$/barile) fino ai 0.116 euro/kWh attuali. Tale valore, che rappresenta un notevole rincaro della spesa elettrica, è sostanzialmente pari al livello di costo del kWh nucleare tanto da poter considerare quest'ultimo ancora allineato a quello degli impianti termoelettrici a olio combustibile. Dai nostri calcoli, quindi, appare poco giustificato l'entusiasmo economico con cui i fautori del nucleare auspicano la ripresa di questa attività.

## 6- La finanza creativa

A questo punto, però, entra in campo la finanza creativa.

Chi ha detto che la produttività annuale delle nuove centrali è come quella delle vecchie? Le statistiche storiche non servono: oggi le centrali producono per 7500-8000 ore equivalenti all'anno (dato contenuto nell'articolo di Clerici già citato). Si ha pertanto  $AEP = 8000 \text{ kWh/kW}$ .

Allo stesso modo per la vita operativa si può tranquillamente assumere il nuovo dato di 40 anni, con buona pace delle preoccupazioni di sicurezza relative all'invecchiamento precoce dei materiali sottoposti alla radioattività. Pertanto il valore del fattore di annualità è quello in corrispondenza di  $N = 40$  anni e cioè: 0.05828. Infine per il prezzo di vendita delle centrali deve fare testo il valore dichiarato a preventivo dalla Finlandia per l'impianto di Oikiluoto, cioè 1875 euro/kW. Inserendo questi nuovi dati nell'espressione del costo si ottiene:

$$C_{\text{kWh}} = (FFT)*I/(AEP) + C_{\text{sc}} = 0.046 + 0.011 = 0.057 \text{ euro/kWh}$$

Ulteriormente, perché fermarsi ad un costo del denaro pari al 5%, quando con qualche garanzia governativa si può spuntare il 4%? Allora il fattore di annualità si abbassa al valore di 0.05052, per cui il costo del kWh si porta a:



$$C_{\text{kWh}} = (\text{FFT}) * I / (\text{AEP}) + C_{\text{sc}} = 0.041 + 0.011 = 0.052 \text{ euro/kWh}$$

In questo modo si dimostra che il costo del kWh nucleare è di un fattore 2 più basso di quello termoelettrico convenzionale.

Da ultimo non dobbiamo dimenticare che il prezzo attuale della vendita dei diritti sulle emissioni di CO2 è situato a circa 20 euro per tonnellata evitata, cioè 0.02 euro/kg. Poiché il fattore medio di emissione del parco elettrico italiano è di circa 0.5 kg di CO2 per kWh, dobbiamo considerare un credito di 0.01 euro/kWh a beneficio del nucleare. Quindi, il costo reale del kWh nucleare si abbassa al valore:

$$C_{\text{kWh}} = 0.042 \text{ euro/kWh}$$

Qui però si ferma la mia audacia, perché per arrivare ai 3 centesimi di euro, dichiarati da Piero Angela o ai 2 di Alessandro Clerici, occorrerebbe assumere una durata degli impianti pari a 50 anni e/o un ulteriore abbassamento del tasso d'interesse al 3% e una spesa per la manutenzione pari anch'essa al 3%. Purtroppo io non ho questo "coraggio".

#### Riferimenti

- Clerici A., "Nuclear: the current world situation", Energy Technologies from Italy 2004-2005, Edizione Italia Energia, pp.125-126
- Tieman R., "Nuclear dinosaurs or fossil fuel power: the hard choice", The Times del 27/7/1993
- Loizzo P., "Le centrali nucleari", Edizione Monteleone Vibo Valentia 1994