

La Tabella Permanente dell'Energia

[1] potenza = 1000 MWe ed energia/anno = 7.8 miliardi di kWh/a	NUCLEARE	CARBONE	OLIO COMBUSTIBILE	GAS CICLO COMBINATO	FOTO VOLTAICO	EOLICO
[2] Costo totale (mills/kWh)	26	52	100	112	[3] 655	181 ²⁸
[4] Costo totale dopo ammortamento (mills/kWh)	12	33	85	104	30	30
Costo del solo combustibile (mills/kWh)	5	27	80	99	0	0
Denari pompati all'interno dell'Italia (mills/kWh)	0.8 26 = 21	0.2 52 = 10	0.2 100 = 20	0.2 112 = 22	0.5 655 = 327	0.5 181 = 91
Denari pompati fuori dall'Italia [5] (mills/kWh)	0.2 26 = 5	0.8 52 = 42	0.8 100 = 80	0.8 112 = 90	0.5 655 = 327	0.5 181 = 90
Abbassa il costo medio di produzione del kWh? (51 mills/kWh)	sì	no nel tempo	no	no	no	no
Accoppiamento con auto elettrica risolutivo	sì	sì	sì	sì	no	no
Capitale totale da reperire (con infrastrutture)	1	5	3	3	50	15
[6] Volume in ingresso alla centrale (m ³ /anno)	3	3 000 000	1 700 000	1 950 000 000	0	0
Volume in atmosfera (m ³ /anno)	0	3 056 200 000	2 401 650 000	1 950 000 000	0	0
Volume di CO ₂ in atmosfera (m ³ /anno)	[7] 0	3 000 000 000	2 302 000 000	1 500 000 000	0	0
Volume di SO ₂ in atmosfera [8] (m ³ /anno)	0	41 000 000	91 000 000	10 000 000	0	0
Volume di NO _x in atmosfera [9] (m ³ /anno)	0	14 000 000	7 000 000	7 000 000	0	0
Volume di polveri in atmosfera (m ³ /anno)	0	1 200 000 [10]	1 650 000	100 000	0	0
Volume residuo, cioè da gestire (m ³ /anno)	10	310 000 [11]	68 000	10	Prodotti chimici per i pannelli	0
Di cui "pericoloso"	3	4 500	1 000	2	tutto	0
Metalli pesanti	no	altissimo	altissimo	alto	no	no
Facilità di dispersione del combustibile nell'ambiente per perdite	nulla	nulla	elevata	elevatissima [12]	nulla	nulla
Noti altri usi per il combustibile	no	sì	sì	sì	non applicabile	non applicabile
Radioattività rilasciata nell'ambiente [13] (Ci/a)	0.5	5.0	2.5	2.5	0	0
Radioattività naturalmente rilasciata dall'ambiente nella stessa regione (Ci/a)	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
(Massa movimentata)/(massa trasformata in energia) (10 ³)	40	3 000 000	2 000 000	1 900 000	0	0
Energia immessa/energia ottenuta in 40 anni (per piccole distanze di trasporto combustibile fossile) [14]	1.7%	5.0%	[15] 3.0%	[16] 3.8% (LNG 17.9%)	27%	16.7%
Possibilità di immagazzinamento (giorni)	illimitata (tipico: 2 000)	7	15	10	0	0

Spazio occupato se potenza elettrica è nominale o picco (ha)	[1] 15	30	20	12	1 000	[2] 13 300
Spazio occupato con andamento potenza reale (ha)	15	30	[17] 20	[18] 12	[19] 8 300	[20] 54 000
Materiali – calcestruzzo armato kg/kW _e NOM,PEAK	190	250	200	180	600	1533
Materiali – acciaio kg/kW _e NOM,PEAK	32	98	87	57	400	507
Materiali – rame, silicio kg/kW _e NOM,PEAK	basso	medio	medio	medio	elevato	elevatissimo
Estetica in elevazione o orizzontale	ottima	pessima	pessima	pessima	pessima	pessima
Morti/giorno (mondo, intero ciclo, senza i cancri da effluenti chimici)	0	25	20	5	0	0
Rischi proliferazione [21]	no	ipotetica	no	no	no	no
Rischi terrorismo [22]	no	ipotetico	alto	alto		
Impatto vita flora e fauna	nullo	medio	medio	medio	alto	alto
Impatto modifiche clima “locale”	nullo	medio	medio	medio	alto	alto
Risorse “ultimate” diviso i consumi attuali per un tasso di incremento del 3%/a e con la tecnologia attuale (anni)	20 000	300	30	45	infinito	infinito
Attendibilità bassi costi nel tempo	sì	sì	no	no	no	limitata
Variabilità storica del combustibile nel tempo [23]	bassissima	elevata	elevatissima	elevatissima	non applicabile	non applicabile
Incidenza del costo del combustibile sul costo del kWh	bassissima	bassa	elevatissima	elevatissima	non applicabile	non applicabile
Tempo di costruzione (anni)	[24] 4	4	4	3	3	1
Costo di impianto (\$/kWe) (senza costo suolo)	[25] 1450 (esiste 1000)	[26] 1770	1500	[27] 700	7200	[28] 2900
Costo dell’impianto (infl.2% int. 3%) (mills\$/kWh)	[29] 13	18	15	15	625	151
Costo combustibile (mills\$/kwh)	[30] 5	27	80	99	0	0
Costo operazione e manutenzione (mills\$/kWh)	7	6	5	5	30	30
Disponibilità [31] (%)	90	90	90	[32] 75	11	14

Locale E:\backup-E\ing\giornali\VIA1

[1] Per 6 unità per sito.

[2] In Danimarca. In Italia va moltiplicato per 8 (ciò vale anche per il dato della riga successiva).

[1] Visto che non esistono miniere di idrogeno, esso va prodotto. Per produrlo serve energia. Se lo si produce per via termica con vapore, il cui ossigeno insieme a metano CH₄ forma l’idrogeno, si ha produzione di CO₂ (quindi è inutile per evitare la produzione di CO₂) e idrogeno; bruciando questo idrogeno con O₂ dell’aria (con fiamma o con celle a combustibile) non si ha guadagno di energia per l’intero ciclo (si depaupera nel processo l’atmosfera di ossigeno: la riduzione di ossigeno localmente viene da molti riconosciuto come causa di cancri). Inoltre la durata delle riserve di gas naturale si ridurrebbe; alla fonte, senza considerare la incidenza in termini energetici del trasporto dell’idrogeno, per ogni 75,466 kJ di metano usato come materiale di alimento o per fornire energia, si ottengono 42,950 kJ di idrogeno; per la sola trasformazione quindi si riducono le riserve quasi di un fattore 2. Le reazioni di cracking ed ossidazione parziale sono in teoria più favorevoli (e si potrebbe separare il carbonio in forma solida) ma la situazione non cambia di molto. E’ per questo che l’idrogeno non viene oggi da nessuno proposto come fonte di energia e non viene inserito nella tabella. L’idrogeno costituisce invece un interessante mezzo per immagazzinare e trasportare energia. Esso può essere prodotto in modo economicamente ed energeticamente appetibile per radiolisi dell’acqua dalle scorie radioattive o per radiolisi o elettrolisi dell’acqua nelle centrali nucleari (in questa maniera non si depaupera l’atmosfera di ossigeno). Si noti che l’automobile ad idrogeno è una macchina elettrica (l’idrogeno reagisce su una membrana dove vengono raccolti gli elettroni) con un sistema per ricaricare la batteria (idrogeno) molto meno pratico di una batteria convenzionale (elettricità). Il motivo per cui non si è mai realizzato il risparmio energetico sta nel fatto che da un barile di petrolio si ottengono sei o sette flussi principali (benzine, diesel,

cherosene aerei, olio combustibile centrali elettriche, nafte, bitumi, lubrificanti, fertilizzanti etc). I flussi in gioco sono talmente talmente enormi (80 milioni di barili al giorno) che per la maggior parte non possono essere immagazzinati se non per piccole quantità e la modifica da un flusso all'altro è molto limitata. Come conseguenza tali flussi devono tutti essere consumati continuamente. Se si realizza un motore per automobili che consuma di meno, lo stesso deve succedere, contemporaneamente per tutti gli altri flussi (per esempio per gli aerei). Il risultato è che il flusso più efficiente determina quanto devono essere gli sprechi negli altri flussi. E' chiaro che in questa condizione blaterare di risparmio è velleitario ed una pia illusione. Con la produzione di energia nucleare invece (l'energia a disposizione dura almeno quanto il sole), si può rompere il circolo vizioso e fare risparmio energetico, producendo i combustibili ad hoc (partendo dall'idrogeno) con tutti i vantaggi sulla purezza dei combustibili usati ed usando petrolio e gas, materiali preziosissimi, per gli usi appropriati dell'industria chimica.

[2]

Tale cifra è stata valutata in 30 anni con interesse del 5%. Ogni anno viene restituito 1/30 del capitale più l'interesse del 3% sul capitale ancora non restituito più il 2% di inflazione.

[3]

Con una durata delle celle di 30 anni. In realtà non è chiaro se durano 10 anni e se riescono a dare indietro l'energia immessa.

[4]

Si veda nota 19.

[5]

Per gas, olio combustibile e carbone, oltre al combustibile da pagare verso l'estero, anche una parte notevole del costo capitale per le infrastrutture viene realizzato al di fuori dell'Italia. Questo comporta un differenziale tra risorse immesse e risorse drenate dal sistema Italia rispetto a Francia, Germania e UK di circa 25 miliardi di dollari ogni anno (cinque finanziarie).

[6]

Per i gas i valori sono a pressione atmosferica.

[7]

In alcune pubblicazioni si legge che anche gli impianti nucleari emettono anidride carbonica, sebbene in misura molto inferiore agli impianti a fossili. Ciò è falso ed è dovuto all'ipotesi di comodo di affermare che siccome nella fabbricazione del combustibile nucleare e dell'impianto si usa l'energia elettrica, e questa energia elettrica viene prodotta anche con gli impianti a fossili, allora quella CO₂ va ascritta agli impianti nucleari. Tutta l'energia elettrica dovrebbe essere prodotta con gli impianti nucleari ed in questo caso la CO₂ emessa è nulla.

[8]

In caso di desolfurazione si hanno 170,000 m³/anno di gesso da smaltire, generate dai desolficatori. Solo una parte limitata è riciclabile, poiché gli usi del gesso in edilizia non sono massicci come quelli del cemento. Se lo si invia a discarica, per diminuire l'impatto ambientale, il gesso viene inertizzato con aumento dei volumi. Si deve evitare percolamento nelle falde acquifere.

[9]

Con abbattimento si possono ridurre del 50% le emissioni ma si creano forti quantità di prodotti pericolosi.

[10]

Più 377 000 t ceneri in aria

[11]

Le ceneri hanno volumi molto elevati e non sono immagazzinabili per cui vengono usati per produrre i cementi usati anche nelle abitazioni. Ci sono problemi di impatto sulla salute. Per il petrolio l'"orimulsion" viene definita una tecnologia ecologica. In realtà si tratta di mischiare i combustibili più inquinanti con acqua per permettere il bruciamento.

[12]

La molecola del metano è 25 volte più efficace della molecola dell'anidride carbonica, ai fini dell'effetto serra. Basta una perdita di gas dell'1.5% del gas impiegato per annullare i vantaggi del gas sul carbone. Considerate tutte le fasi di estrazione, trasporto, immagazzinamento e distribuzione, le perdite sono almeno dieci volte tanto. Sostituire quindi le centrali a carbone con centrali a metano è fortemente controproducente ai fini dell'effetto serra; al contrario i paesi che fanno questo cambiamento si accreditano attualmente per una diminuzione dei gas serra. Dal 1800 la concentrazione atmosferica di anidride carbonica è aumentata del 30% mentre quella di gas naturale del 130%. Almeno metà del gas naturale rilasciato in atmosfera è dovuto alle attività energetiche. Nei giacimenti il metano è mischiato a CO₂ (la CO₂ è il 20% del totale). La CO₂ viene rilasciata in atmosfera. Parlando invece di terremoti la estrazione di gas e petrolio su enorme scala provoca forti variazioni delle pressioni su enormi volumi nelle cavità. L'abbassamento del terreno è un'altra conseguenza.

[13]

La radioattività nucleare naturale (presente in natura prima di Fermi) vale mediamente 300 mRem/anno (cinque milioni di anni fa era molto più forte). Di questi, A) 200 mRem/anno sono dovuti al gas radon, B) 33 mRem/anno provengono dal cosmo (sole più galassie), C) 33 mRem/anno dai materiali che ci circondano e D) 33 mRem/anno dall'interno del nostro corpo. Questi valori variano da punto a punto, anche spostandosi di pochi metri. A) può variare fino a 10000 (diecimila) mRem/anno, B) varia con l'altezza (montagne, aereo) e può arrivare a 10000 mRem/anno, C) varia con i materiali (basalti, lave, tufi, pozzolana, peperino, granito, gneiss, sanpietrino, piastrelle etc) e può arrivare a 10000 mRem/anno e D) varia con il cibo e l'acqua che si beve. Se si raffrontano questi dati con Chernobyl si può constatare che, indipendentemente dai rapporti scientifici (che pure lo confermano), Chernobyl per la salute umana è stato un non evento. La radioattività media nei dieci chilometri attorno alla centrale è oggi di 500 mRem/anno mentre la radioattività naturale a piazza San Pietro in Roma può essere misurata in 800 mRem/anno.

Table – Long known effects of radioactivity

mRem/yr	classification	comment
0.1	lethal	extreme condition
1.0	moribund	laboratory condition

10	deficient	unusual environment
100	minimal	low natural background
1000	marginal	high natural background
10 000	optimal	recommended dose rate
30 000	marginal	unusual natural background
100 000	acceptable	professional limit
1 000 000	maximum	sanitary limit. Detectable increase of tumors beyond 80,000 mRem (i.e. if condition lasts 30 days).
10 000 000	excessive	chronic radiation syndrome. Detectable increase of tumors beyond 80,000 mRem (i.e. if condition lasts 3 days).
100 000 000	lethal	acute radiation syndrome when 700 000 mRem are reached in 61 hr.
870 000 000	lethal	acute radiation syndrome when 700 000 mRem are reached in 7 hr.

[14]

Se si tiene conto delle reali condizioni di “coltivazione” dei pozzi (in alcuni casi per assicurare la pressione si pompano dentro 3 barili di acqua di mare per tirarne fuori uno di petrolio) e della energia consumata nei trasporti e raffinazione i dati per i fossili vanno aumentati anche di un ordine di grandezza.

[15]

In realtà l’energia richiesta può superare il 20%

[16]

In realtà l’energia richiesta può superare il 20%. 50 anni fa l’EROEI Energy Returned On Energy Input, il rapporto fra l’energia che si ottiene su quella che si deve immettere, era 70 ed è andato via via diminuendo fino ad oggi che è circa 3 (tre).

[17]

Tale dato va aumentato di circa 400 ha per 10 impianti più 40 ha per impianto per tener conto delle strutture (per lo più tubazioni) da costruire, dentro e fuori dal territorio nazionale (nota 20).

[18]

Tale dato va aumentato di circa 600 ha per 10 impianti più 50 ha per impianto per tener conto delle strutture (per lo più tubazioni) da costruire, dentro e fuori dal territorio nazionale (nota 20).

[19]

Al di fuori dell’atmosfera terrestre alla latitudine del nord Africa, alle 12:00 di un giorno di giugno l’irraggiamento non può mai essere superiore a 1380 W/m²; alle 12:00 di un giorno di gennaio tale valore è 1100 W/m²; Alla latitudine di Trapani l’irraggiamento *diretto* al suolo alle 12:00 di un giorno di giugno non può mai essere superiore a 800 W/m²; alle 12:00 di un giorno di gennaio tale valore è 600 W/m²; il valore **medio annuale** dell’irraggiamento diretto è 220 W/m²; tenendo conto del fatto che sul pannello fotovoltaico arriva anche parte dell’irraggiamento *diffuso* dall’atmosfera terrestre e di quello *riflesso* dal suolo, assegniamo i dati della prima colonna della tabella 1.

Tabella 1

	ipotetica al suolo: diretta+diffusa+ riflessa PICCO ESTIVO	ipotetica al suolo: diretta+diffusa+ riflessa MEDIA ANNUALE								DA FOTOVOLTAICO CONTINUO	INVERTER CONTINUO ALTERNATO			
	SENZA NUBI	SENZA NUBI	HUBI	DOPO HUBI	hr/d	d/a	kW/W	peak/ 12-hr average	kWh _e / a-m ²			kWh _e /a-m ²	@12:00-giorno-di- giugno senza nubi W _e /m ²	@12:00-giorno-di- giugno senza nubi m ² kW _e
MILANO	899	787	0.65	511	12	365	1000	0.315	705	0.13	0.85	78	99	10.07
BOLOGNA	908	795	0.7	556	12	365	1000	0.315	767	0.13	0.85	85	100	9.97
AREZZO	931	815	0.77	627	12	365	1000	0.315	865	0.13	0.85	96	103	9.72
TRAPANI	964	844	0.89	751	12	365	1000	0.315	1036	0.13	0.85	114	107	9.39

Per il centro Italia alle 12 di un giorno di giugno senza nubi si hanno 931 0.13 0.85 = 103 W_e/m²; ciò significa che c’è bisogno di **9.72 m²** per generare un kW_e.

Per ottenere 3000 kWh_e in un anno bisogna dispiegare una superficie di pannelli fotovoltaici di 3000/96=31 m²(per considerare lo spazio per la pulizia e la manutenzione 47 m²). Nel 2000 alla latitudine di Bologna sono stati venduti 25 m² di pannelli fotovoltaici per 30 milioni di lire (non chiaro se era incluso il montaggio); la potenza veniva dichiarata (supposta di picco estivo) di 2.5 kW_e; 25/2.5=10 m²/kW_e; questo si confronta bene con il dato in tabella; 30 milioni/25 m²=1.2 milioni Lit/m² 1/1936.27 1.17 = 725 \$/m²; 725 \$/m² 10 m²/kW_e = 7250 \$/kW_e.

Per un impianto di potenza: in un anno si generano $7.88 \text{ miliardi kWh} \cdot 1/96 = 82 \text{ milioni m}^2 = 8208 \text{ ha}$ (per considerare lo spazio per la pulizia e la manutenzione **12312 ha**).. La potenza di picco impegnata deve quindi essere di $103 \text{ W/m}^2 \cdot 82 \text{ milioni m}^2 = 8446 \text{ MW}_e$. Dispiegando 82 milioni di m^2 di pannelli fotovoltaici al costo di $725 \text{ \$/m}^2 = 59 \text{ miliardi di \$}$, ovvero al costo di $7250 \text{ \$/kW}_e \cdot 8.446 \text{ milioni di kW}_e = 61 \text{ miliardi di \$}$.

La potenza installata è 8446 MW_e ed il fattore di utilizzazione (fattore di richiesta uguale ad 1 come per gli altri impianti del confronto) è $FU = 815/931 \cdot 0.77 \cdot 0.315 \cdot 12/24 = 0.106$; la quantità di kWh_e prodotta ogni anno è $8446 \cdot 1000 \cdot 0.106 \cdot 365 \cdot 24 = 7.8 \text{ miliardi kWh}_e$. Il costo di produzione (generazione) del kWh_e risulta di 655 mills/kWh_e . Questo si deve confrontare con i 546 mills/kWh_e corrisposti al proprietario dell'impianto che abbia finanziato l'impianto per almeno l'80% del costo, in accordo alla recente legge. Però l'impianto non è certo se durerà 7 dei 30 anni ipotizzati per il calcolo. Nel caso di una centrale nucleare si tratta di finanziare 24 dollari per abitante, nel caso di un impianto a pannelli fotovoltaici equivalente in termini di energia prodotta si devono trovare finanziamenti di 1070 dollari per abitante. Per ogni impianto che fornisca l'energia di una centrale da 1000 MW_e . Considerato che l'Italia ha bisogno di 30000 MWe nel breve, si tratta nel caso del nucleare di 720 dollari per abitante mentre nel caso del fotovoltaico ogni abitante sarà caricato con un conto di 32100 dollari (128400 dollari per una famiglia di 4 persone).

Le celle fotovoltaiche disponibili in commercio trasformano la luce solare in elettricità con efficienze dal 4 al 14% (il resto è disperso in riflessioni e calore). Il limite tecnologico di queste celle "massicce" (monocristalline, rendimento del 14%; policristalline, rendimento del 10%; amorfe 5%) è del 33% (quest'ultimo rendimento si ottiene a costi molto elevati di produzione). Il limite termodinamico della trasformazione fotovoltaica (impiegando quindi materiali e tecnologie futuribili) è del 93%. Il rendimento del 14% si ottiene solo quando la temperatura è di 25°C . All'aumentare della temperatura il rendimento diminuisce.

Si tenga inoltre presente che per assicurare la stabilità della rete nei nodi dove impianti eolici o solari immettono potenza (discontinua), bisogna costruire potenza certa per evitare il collasso della rete. Questo ha un ulteriore costo economico perché questi impianti non possono essere usati per la produzione.

[20]

Per ottenere la potenza di 1000 MW_e questo valore va diviso per il fattore di disponibilità dell'impianto. Dalla esperienza tedesca dal 1990 al 2005, con $14 \cdot 612 \text{ MW}_e$ installati di eolico si producono in un anno $18.2 \text{ miliardi di kWh}$. Il fattore di utilizzazione risulta quindi $18.2 \cdot 10^9 / 14612 \text{ MW}_e \cdot 1000 \text{ kW/MW} \cdot 24 \text{ hr/d} \cdot 365 \text{ d/a} = 0.14$. $12500 / 0.14 = 89286 \text{ (ha)}$. Ciò significa che per avere la potenza di 1000 MW_e bisogna costruire circa 7 impianti da $12,500 \text{ ha}$ in zone molto distanti fra loro in modo che quando in un impianto non c'è vento sia alta la probabilità che almeno uno degli altri 6 possa prendere carico. E' il limite di questi impianti. Si tenga inoltre presente che per assicurare la stabilità della rete, nei nodi dove impianti eolici o solari immettono potenza (discontinua) bisogna costruire potenza certa (circa un terzo della potenza solare; questi impianti in stand-by per definizione non devono produrre e devono essere pronti ad intervenire) per evitare il collasso della rete. Uno "show stopper" per l'eolico sono i fili sotterranei. Quando si osserva un mulino a vento, pochi pensano che ci sono i fili sottoterra. Con $54 \cdot 000$ ettari si ha un quadrato di 23 km di lato, tutto percorso sottoterra da fili di rame a 32 kV . Si tratta di un bel costo (i fili sotterranei costano molto di più di quelli aerei). Siccome spesso i mulini sono fermi, difendere da furti di rame è difficile. Inoltre con quelle distanze da percorrere le sole perdite rappresentano un problema non indifferente.

Nel caso della centrale nucleare si tratta di finanziare 24 dollari per abitante, nel caso degli impianti eolici si devono trovare finanziamenti di 326 dollari per abitante. Per ogni impianto che fornisca l'energia di una centrale da 1000 MW_e . Considerato che l'Italia ha bisogno di 30000 MWe nel breve, si tratta nel caso del nucleare di 720 dollari per abitante mentre nel caso dell'eolico ogni abitante sarà caricato con un conto di 9790 dollari (39160 dollari per una famiglia di 4 persone)

A differenza del solare, l'eolico produce elettricità anche di notte, il suolo non è completamente coperto e può ancora essere usato per agricoltura (per allevamento si deve verificare produzione di latte/crescita con rumore). I mulini a vento se non sono di potenze ridotte, producono rumore e una wind-farm, dove ci sono le aquile, uccide un'aquila al giorno. Sulla punta di ognuna delle pale la normativa aeronautica prevederebbe una luce di potenza che dipende dell'altezza raggiunta dalla pala (di notte effetto luna park); tale luce, contrariamente alla potenza fornita dal mulino, deve essere accesa 24 ore al giorno e costituisce un'assorbimento non trascurabile). La realizzazione delle tre wind-farm nelle gole tra l'Arizona e la California potrebbe essere la causa dello scavalco di Los Angeles da parte dei venti e la ragione dell'elevato inquinamento della città (un elevato numero di veicoli era presente anche prima della realizzazione delle wind farms).

[21]

Le centrali nucleari possono essere usate se si vogliono produrre in maniera economica ventimila bombe atomiche per la lotta fra superpotenze. Le strutture e le attività necessarie sono rivelabili (frequente fermata centrali, esplosioni di prova etc). Per produrre poche bombe atomiche la via praticabile consiste in attività di estrazione da miniera ed arricchimento. Le attività di arricchimento richiedono elevata tecnologia solo se si ricerca l'economicità. In uno scenario mondiale in cui, abbandonato il saggio approccio di Eisenhower, l'unico possibile, l'energia nucleare è stata contrastata con la scusa della lotta alla proliferazione, si è solo raggiunto il bel risultato che i paesi meno controllabili hanno le bombe atomiche ed i paesi più affidabili no. Nessuno dei paesi non controllabili e con le bombe atomiche, ha avuto bisogno di un programma nucleare civile. La via per impedire la proliferazione è un forte programma nucleare civile con tecnologia imposta (Eisenhower); se proprio si vuole, con gestione del combustibile "hands off" (ma se le cose sono fatte per bene questo non è necessario).

[22]

Per costruire armi di distruzione di massa (non ben definite) nucleari c'è bisogno di strutture ed attività rilevabili. Nelle ceneri di un impianto a carbone si accumula ogni anno tanto combustibile nucleare sufficiente a fare un paio di bombe. Per costruire armi di distruzione di massa batteriologiche basta una cucina. Per costruire armi di distruzione di massa chimiche non serve neppure una cucina. Gli impianti non nucleari hanno strutture esili, estese e non protette e contengono materiali allo stato fluido, altamente infiammabili e sotto attacco sprigionano forti noti cancerogeni e veleni.

[23]

Senza voler citare la situazione attuale in cui il prezzo di petrolio e gas hanno variazioni enormi in tempi brevissimi, anche in tempi nei quali erroneamente tali prezzi venivano considerati stabili, le variazioni erano forti. Per esempio nel marzo/aprile 2000 (allora i prezzi erano in lire), l'autorità per l'energia elettrica ed il gas ha fornito i seguenti dati, relativi alla sola componente variabile del costo del kWh: carbone 37 Lit/kWh; olio combustibile 71 Lit/kWh; gas 75 Lit/kWh. L'anno successivo, gennaio/febbraio 2001: carbone 42 Lit/kWh; olio combustibile 107 Lit/kWh; gas 123 Lit/kWh.

Il prezzo del gas a bocca di pozzo tra il 1990 ed il 2000 è aumentato di $0.1 \text{ \$/ft}^3$ all'anno con picchi sistematici che hanno raggiunto il 320% in

1.5 anni. Una fonte di energia che non sarebbe mai scelta da un imprenditore libero che voglia avere un qualche grado di capacità di controllo sulla sua attività e sul suo investimento. Si tenga presente che un vero imprenditore non vede di buon occhio neanche la diminuzione repentina di questi prezzi (lo potrebbe mettere in difficoltà nei confronti di altri imprenditori-scorococcia). Per il nucleare al contrario il costo del combustibile ha un impatto molto limitato sul costo totale del kWh (questo è un elemento dirimente sulla scelta di un imprenditore libero) e si mantiene stabile dopo essere sceso da 43 \$/lb dopo la prima crisi del petrolio nel 1973 a 12 \$/lb nel 1997 per poi risalire negli anni successivi. L'uranio è ben distribuito su tutto il mondo e non è necessario il controllo militare di vaste aree geografiche come è invece necessario per petrolio e gas (pozzi ma soprattutto pipeline e rotte navali). Tale costo non è oggi incluso nel costo di gas e petrolio e va considerato una forma forte di sovvenzione. Anche il numero delle società che arricchiscono l'uranio è abbastanza diversificato ed in ogni caso è attiva l'opzione dei reattori ad uranio naturale. Al contrario di carbone, gas e petrolio, per i quali ad un certo punto l'energia da spendere per l'estrazione diventa superiore a quella che ridaranno indietro, per il combustibile da fissione ci si può prendere amorevole cura di un atomo alla volta ed ancora avere indietro energia netta.

[24]

Per alcuni impianti 5 anni, per altri 3 anni. Oggi gli impianti sono stati molto semplificati.

[25]

Nel 1970 il costo overnight per la utility di una centrale a carbone era di $500\$/kW_e^{1970}$ mentre quello di una centrale nucleare era di $600\$/kW_e^{1970}$.

Nel 2006 tali numeri erano divenuti rispettivamente $1700\$/kW_e^{2006}$ e $1400\$/kW_e^{2006}$. Questo per costruire 2 unità. Se si costruivano molte unità (6 o più) il costo era di $1000\$/kW_e^{2006}$.

Alla fine del 2005 Marvin Fertel della NEI chiese una audizione presso il senato US per denunciare che il numero usato dal governo per il confronto del costo del kWh di $1900\$/kW_e^{2005}$ era errato ed al suo posto per due unità si sarebbe dovuto usare $1400\$/kW_e^{2005}$. Nella stessa data divenivano disponibili dati del governo francese per l'EPR ($1300\$/kW_e^{2005}$) e di Areva per Olkiluoto ($2300\$/kW_e^{2005}$).

Nel 2007 Westinghouse vendeva alla Cina 4 AP-1000 su due diversi siti per $1800\$/kW_e^{2007}$ e Areva vendeva 2 EPR alla stessa Cina per $3000\$/kW_e^{2007}$.

Proprio mentre negli US iniziavano i primi arresti per corruzione, alcune agenzie di rating affermavano che il costo overnight nucleare era di $8000\$/kW_e^{2008}$. Una prestigiosa istituzione di Cambridge affermava che in due anni, a causa dell'aumento dei costi dei materiali, il nucleare era salito molto più velocemente di carbone e gas ciclo combinato. Ci furono forti difficoltà a riconciliare questo fatto col fatto che i chili di materiale per kW_e installato, nel caso del nucleare è circa la metà (e quindi il rateo di crescita deve essere la metà per il nucleare nei confronti del carbone, non il doppio).

Per fortuna alla fine del 2008 intervenne la associazione nucleare dell'Asia (Pacifico) ad affermare che tali aumenti erano falsi e che laddove nel 2002 si usava $2000\$/kW_e^{2002}$, nel 2008 tale cifra era ancora $2000\$/kW_e^{2008}$. Si noti che storicamente il costo di costruzione nucleare e.g. in Giappone è più elevato di quello in US ed Europa. Ciò, per la parte dovuta alla sismica, non dovrebbe far parte del costo overnight perché il costo overnight per definizione non deve includere costi site-specific o costi di finanziamento, inflazione etc. Purtroppo invece, specialmente per i costi a consuntivo sistematicamente i costi site-specific vengono inseriti nel costo overnight.

Nel 2008 una centrale nucleare vecchia di trent'anni veniva valutata a $2500\$/kW_e^{2008}$. Il valore per una centrale a carbone era di $500\$/kW_e^{2008}$ mentre quello di una gas ciclo combinato è nullo visto che la pratica è, dopo 7 anni, di buttare via l'intera turbina invece di mantenerla.

Alla fine del 2008 alla NEI Mr. Fertel riguadagnava una posizione di preminenza dopo la defenestrazione, avvenuta in malo modo, di Mr. Bowman. Nel frattempo NEI aveva cominciato a dire che alcuni costi overnight per il nucleare erano a $4000\$/kW_e^{2008}$.

Tale dato include il 3% di costo di smantellamento. Nel 2002, al netto delle tasse il kWh in media in Italia veniva pagato 126 mills/kWh. Essendo il costo del combustibile nucleare bassissimo si possono realizzare strategie tariffarie in modo da restituire il capitale in 2 anni. Una simile strategia non è perseguibile con i fossili per i quali l'incidenza del costo del combustibile è enorme anche nei periodi in cui il combustibile costava "poco".

[26]

Costo di impianto $1300\$/kW_e$. Il dato non include i costi di smantellamento. I seguenti costi debbono essere inclusi o nel costo del combustibile o in quello di impianto. Non sono inclusi nel costo del combustibile le strutture necessarie per la movimentazione dalla frontiera: $500\$/kW_e$. Se non si include tale costo, il costo del kWh risulterebbe del 15% inferiore. Per il carbone valgono considerazioni simili a quelle fornite nella nota successiva per quanto riguarda le infrastrutture per il gas (ma il trasporto del carbone è molto più oneroso di quello degli idrocarburi).

[27]

Costo impianto $700\$/kW_e$. Il dato non include i costi di smantellamento. Questo dato deve intendersi per una offerta promozionale in quanto il costo per kg dei materiali risulta stranamente basso. Si tratta di materiali preziosi (titanio) con lavorazioni da gioielleria. I seguenti costi debbono essere inclusi o nel costo del combustibile o in quello di impianto (altrimenti si incorre nel caso Enron). Per le tubazioni di petrolio Baku Tbilisi Ceyan (50 milioni di tonnellate all'anno) il costo è stato di 2.1 milioni di dollari a km. Si tratta di tubazioni a "bassa" pressione (378 ton/km). Le tubazioni a gas vanno dalle 60 alle 300 atmosfere. Per la linea verso l'Europa che arriva dalle sconfinite distese russe (pozzi di Yamal, 5500 km fino al centro Europa) la tubazione gas per 30 miliardi di Nm^3/a pesano 1640 t/km . Con il prezzo del solo metallo a $1100\text{ \$/t}$ (bilanci societari russi) il solo materiale costa 1.8 milioni di dollari a km. Si tratta di portare i tubi sul posto (lungo 5500 km), lavori sul terreno, saldare gli spezzoni (tempo proporzionale agli spessori), mettere una stazione di pompaggio (sono delle centrali vere e proprie, assorbono, non tenendo conto delle fuoriuscite di gas, in realtà enormi, un decimo della potenza trasportata) ogni 150 km , etc. Non si può parlare di meno di 8 milioni di dollari a km. Invece vengono dichiarati costi di 2.5 milioni a km. Adducendo fantomatici breakthrough tecnologici (come le saldature elicoidali, in realtà tecnologie in uso da sempre). Una improvvisa diminuzione dei costi per fantomatici breakthrough tecnologici si osserva anche per le metaniere se le si confronta con i costi delle petroliere. Si deve tenere conto che per riempire di affittuari le torri gemelle ci vollero 25 anni. Qui dopo aver convinto qualcuno, con l'aria che tira e le recenti esperienze che dimostrano che i pozzi di gas si esauriscono in maniera molto più repentina (gas invece di liquido, perdite per assestamenti geologici da diminuzioni di pressione anche piccoli) dei pozzi di petrolio, che il gas durerà per 10 anni, significa adottare nei calcoli la piena portata per 5 anni (a quelle portate, a regime, il 3% della lunghezza delle tubazioni va sostituita ogni anno). A questo vanno aggiunti i costi di esercizio (personale e manutenzione ordinaria). Per una tubazione di 2500 km per 10 centrali a gas c.c. da 1000 MWe si ha $900\text{ milioni \$/anno}$. Nel caso di 5500 km

per 20 centrali quindi circa 2500 milioni \$/anno. Ma anche volendo usare il ridicolo costo di 2.5 milioni di dollari a km, e non tenere conto di quanto sopra e senza includere i costi per operation and maintenance O&M, non si può scendere di sotto di 9 \$/GJ. Poi il gas a bocca di pozzo lo si dovrà pagare 1.3 \$/GJ (nel 2004 è arrivato a 7 \$/GJ). Poi bisognerà portare questo gas dal centro Europa alle centrali in Italia. Con i dati del 2001, ogni contratto per linea con tubazioni in piano (per gallerie e mare fattore 2 o 3) di 2,500 km, al di sotto di 3.3 \$/GJ per il primo anno e 2.2 \$/GJ dopo 20 anni e di 5.4 \$/GJ con tratto in metaniera, deve essere considerato sovvenzionato (20 anni di ammortamento al 3% e metano alla fonte dato a prezzo del costo di estrazione, cioè regalato). Per il metano dalla regione caspica, dopo averlo prelevato da Ceyan, si ottiene con tubazioni un costo di 5.4 \$/GJ e con tratto in metaniera un costo di 8.6 \$/GJ. A cui va naturalmente aggiunto il costo del gas a Ceyan. Il caso di centrale elettrica sul mare senza tubazioni è anche meno favorevole. Mettendo dentro tutti i costi sopra citati, se si vedono prezzi alle utilities inferiori a 14 - 21 \$/GJ, si può star certi che il costo reale è stato fatto pagare alla massaia o ai piccoli risparmiatori (caso Enron). Tali schemi di sovvenzione a volte vanno sotto il nome di "sinergie".

Con le metaniere i costi sono superiori specialmente per brevi distanze (se aumenta la distanza dal punto di approvvigionamento, per mantenere il flusso per 10 centrali a gas ciclo combinato da 1000 MW, si deve aggiungere una metaniera da 130 000 m³ liquidi ogni 700 km di distanza andata e ritorno). Per alimentare 20 centrali da 1000 MW a gas ciclo combinato da un porto di approvvigionamento distante 10 000 km ci vorrebbe un formicaio di 60 navi. Quello che si risparmi in costo capitale rispetto alle tubazioni lo si paga in termini di costo di personale, combustibile etc. Poi c'è da aggiungere il costo dell'impianto di liquefazione e quello di rigasificazione. E questo solo per ridurre l'attuale deficit di potenza elettrica in Italia. Questo effetto formicaio ha già provocato le prime alzate di scudi in Finlandia e ai Dardanelli. E non si è neanche cominciato.

Non sono inclusi nel costo del combustibile i costi della movimentazione dalla frontiera. Nel costo di impianto viene quindi aggiunto 400 \$/kWe. Se queste tubazioni non vengono messe tra i costi per la centrale e vengono fatte pagare dalla società che fornisce il gas bisogna includere gli interessi ed il profitto della società medesima. Quindi il risultato sarà più oneroso di quello qui ottenuto. Usando quindi 700 \$/kWe al posto di 1200\$/kWe, il costo del kWh (con 8 \$/GJ) risulterebbe 70 mills/kWh invece di 77 mills/kWh. Come si vede la situazione non cambia molto. Con l'impianto a gas ciclo combinato regalato del tutto, si ha un costo di 61 mills/kWh contro i 26 mills/kWh del nucleare tutto compreso. Il kWh da gas ciclo combinato può costare quanto il nucleare solo col gas a 0.8 \$/GJ. Anche in questo caso tuttavia conviene il nucleare perché l'80% del costo di generazione per il gas viene speso verso l'esterno del sistema, al contrario del nucleare dove l'80% viene speso all'interno del sistema (si tratta di valori paragonabili a diverse finanziarie all'anno).

Il vero libero imprenditore non si metterebbe mai a produrre il kWh altro che con il nucleare per la certezza che altrimenti sarebbe fuori qualsiasi libero mercato. Solo la distorsione del mercato elettrico con sovvenzioni, ritardi indotti nella costruzione delle centrali nucleari e la rimozione del fatto che la radioattività in natura esiste, hanno portato all'attuale situazione.

Se si costruisce una sola centrale a gas ciclo combinato da 1000 MW_e si può sperare di doversi limitare a costruire 400 km di tubazione per congiungersi ad un hub sufficiente (o spesa relativa a centrale su mare). Ma se si costruiscono 5, 10 o 20 centrali si deve fare una tubazione apposita fino ai pozzi. Si tratta di 8 milioni \$/km per 5500 km (fino al più vicino "hub") diviso 20 uguale 2.2 miliardi di \$ per centrale. Si tratta di 2200 \$/kW_e installato che va finanziato oltre al costo della centrale (si ricorda che tale tubazione deve essere costruita esclusivamente per la decisione di costruire tali centrali); se si usa il dato irrealistico in auge di 2.5 milioni di dollari al km si avrebbe che al costo della centrale va aggiunto 688 \$/kW_e. E' in questa situazione che si vuole sostenere che è il nucleare che ha bisogno di costose infrastrutture e quindi di sovvenzioni. Per il nucleare dopo aver costruito la centrale al massimo c'è bisogno di un camion con rimorchio che ogni due anni porti il combustibile. Può essere utilizzato da tutte le centrali ed il suo costo va suddiviso di conseguenza. Nei costi del combustibile nucleare questo costo è già incluso, come tutti gli altri costi, contrariamente ai fossili. Va notato che in pratica tutta la spesa per le tubazioni viene fatta all'estero.

[28]

Si fa riferimento ad un impianto off-shore distante 30 km dalla costa e profondità di 40 m, caso di interesse per l'Italia. E' indicativo che in Germania non si prevede più di costruire mulini a vento sul territorio, ma solo off-shore. E' anche indicativo che la Danimarca ha smesso di installare mulini a vento dal 2004. Per impianti su terraferma vengono dichiarati 1000 \$/kW_e. Valori più realistici sarebbero 1300 \$/kW_e per la terraferma e 2400 \$/kW_e per l'off-shore (gli ultimi impianti in palude con mulini da 1650 MWe costano 1600 \$/kW_e). A questo si deve aggiungere il costo della potenza di stand-by. Potendo la potenza venire a mancare per mancanza di vento, nella Germania l'esperienza ha dimostrato che per ogni kW installato di eolico bisogna prevedere 1/3 di kW affidabile per non fare cadere la rete. Anche se l'impianto è pre-esistente, tale costo va attribuito alla presenza dei mulini a vento. Il gas ciclo combinato non si presta a seguire carico. Quindi la potenza deve essere nucleare, a gas non ciclo combinato o ad olio combustibile. Il costo per l'eolico off-shore risulta quindi di 2900 \$/kW_e. L'esperienza fino ad oggi per gli impianti on-shore ha dimostrato 40 mills/kWh di O&M per la terraferma. Questo valore è relativo a mulini a vento di 300 kW_e prevalenti nel passato. Oggi la tendenza è verso impianti di taglia maggiore (700 e 1500 MW_e). La speranza quindi è che l'O&M su terraferma si riduca a 30 mills/kWh. Per l'off-shore si dovrebbe prevedere almeno il doppio. Sulla punta di ognuna delle pale la normativa aeronautica prevederebbe una luce di potenza che dipende dell'altezza raggiunta dalla pala; tale luce, contrariamente alla potenza fornita dal mulino, deve essere accesa 24 ore la giorno e costituisce un'assorbimento non trascurabile. Per evitare ciò, la tendenza attuale è di far emettere della normativa ad hoc per i mulini a vento che tenda ad essere meno severa. In realtà il mulino a vento per sua natura deve protrudere sensibilmente rispetto a tutta l'orografia circostante (soprattutto davanti al mulino) ed è costituito da strutture molto più massicce, per esempio, delle antenne. Quindi la normativa dovrebbe essere più, e non meno, severa. Ciò comporterebbe che il mulino dovrebbe essere visibile (600 lux di giorno 40 lux al crepuscolo e 4 lux di notte, senza foschia) a 5 km (distanza minima di reazione per jet commerciale). In questa maniera il mulino assorbirebbe, invece di generare, energia. Quindi si parla di distanze di 700 m. Per un mulino a vento da 4.5 MW_e (torre di 120m e pale di 112m di diametro) una normativa neutra porterebbe ad un consumo di 450 000 kWh_e (multi lampade, luce bianca intermittente su più livelli). Questo da solo comporterebbe un aumento delle spese di O&M di 3 mills/kWh. Le lampade hanno una vita breve e vanno sostituite. Con gli stessi criteri, al di sotto di mulini da 150 kW non si genererebbe energia. Si cerca di stare sotto i 150 m dove la normativa è meno severa. Le luci vengono oggi, contrariamente alla normativa, messe alla cima della torre, invece che alla cima delle pale. Esistono dei progetti in cui la luce si accende alla punta della pala quando questa supera i 120°; di notte si ottiene un effetto luna park.

[29]

Il valore del capitale immesso nell'impianto non va a zero in 60 anni come gli altri impianti e le autorità non permettono di scaricarlo per intero sul costo del kWh. Questo è confermato dal mercato USA della compravendita delle centrali elettriche in cui le nucleari sono le uniche praticamente a mantenere il valore con un costo di acquisto per kWe installato simile a quello di costruzione. Tale considerazione non è stata tenuta in conto nel calcolo del costo. Le manutenzioni straordinarie prevedono la sostituzione dei generatori di vapore per un impianto nucleare ogni 30 anni, della caldaia per carbone, olio combustibile e gas e la ripaletatura della turbina a gas ogni 2 anni. Anche tali costi non sono stati inclusi.

[30]

Dati per il calcolo: acquisto uranio 97 \$/kgU₃O₈; 7.5 kg U₃O₈ iniziale per kg di UO₂ finale (costo per uranio 97 x 7.5 = 728 \$/kgUO₂); 12 \$/kg U per trasformazione l'U₃O₈ in esafluoruro UF₆ (costo trasformazione 12 x 7 = 84 \$/kgUO₂); 4.8 unità di lavoro separativo ULS per ottenere 1 kg UO₂ al 3.5% in U-235; 127 \$/ULS (costo per arricchimento: 4.8 x 127 = 610 \$/kgUO₂); fabbricazione 240 \$/kgUO₂; altro 40 \$/kgUO₂. Totale 1702 \$/kgUO₂. Stoccaggio in cask o riprocessamento 800 \$/kgUO₂. Totale finale 2502 \$/kgUO₂. Si noti che a parità di altre condizioni con rifiuti simili 800 \$/kgUO₂ dovrebbe essere 8 \$/kgUO₂. In 800 \$/kgUO₂ va incluso qualsiasi tipo di rifiuto.

[31]

L'uso di un valore del 90% anche per il gas c.c non cambia lo scenario: 74 mills/kWh invece di 77 mills/kWh.

[32]

Per gli impianti a gas ciclo combinato il valore reale è molto inferiore; tale valore viene ottenuto a scapito della capacità di variare la potenza erogata in accordo alle richieste della rete. Contrariamente a quanto si ripete per il nucleare invece i francesi hanno dimostrato che le centrali nucleari non presentano questo problema.

AVVISO: L'autore declina ogni responsabilità per l'uso dei dati.