

# CONOSCERE PER DECIDERE: ELETTRICITA' FOTOVOLTAICA, ELETTRICITA' NUCLEARE E MERCATO ELETTRICO

*Francesco Meneguzzo*  
*Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Biometeorologia*  
*ASPO Italia*

7 giugno 2011



## **PREMESSA**

Numerose sollecitazioni mi hanno spinto a produrre questo intervento, che ha richiesto un lavoro abbastanza faticoso: il [livello disperatamente basso e politicizzato del dibattito pubblico sul prossimo Referendum nucleare](#), l'[intervento del A.D. di Ecoware \(Padova\), Leopoldo Franceschini, al Italian PV Summit di Verona il 3 maggio 2011](#), la serie di post di Domenico Coiante (ASPO Italia, Amici della Terra) sul [costo del kWh nucleare](#) e sul costo del kWh fotovoltaico (in ordine cronologico: [qui](#), [qui](#) e [qui](#)), infine la sollecitazione di Beppe Caravita (giornalista de Il Sole 24 ore e blogger) che ha pubblicato sulla materia di cui trattasi un [ottimo intervento sul suo blog, includendo una mia prima risposta "a caldo"](#).

Le domande cui questo lavoro cerca di dare risposte il più possibile rigorose e accurate sono abbastanza semplici e allo stesso tempo strategiche:

- **L'elettricità dalla fonte fotovoltaica costa più o meno di quella da fonte nucleare?**
- **Come si posizionano i costi dell'elettricità da fonte fotovoltaica e nucleare rispetto al mercato elettrico corrente?**

Come vedremo, la seconda domanda richiede un'attenzione particolare, perché le "fasi" del mercato elettrico interessate dall'elettricità fotovoltaica e nucleare sono molto diverse e di conseguenza diversi sono i prezzi di riferimento e confronto. Torneremo in seguito su questo argomento.

Si prescindereà, inoltre, da qualsiasi altra considerazione che non riguardi direttamente e concretamente il **prezzo al quale un operatore può essere in grado di offrire la propria elettricità sul mercato elettrico libero**, e in particolare **non saranno considerati**, a titolo d'esempio:

- Benefici e/o costi ambientali, salvo che esplicitamente dichiarato sia nella presente nota sia nei link di riferimento;
- Questioni di sicurezza, rischi potenziali per la salute e i beni;
- Disponibilità delle risorse eventualmente necessarie per la generazione (per es. di [235U](#), [su cui consiglio la sempre attualissima analisi di Terenzio Longobardi](#));
- Bilancio energetico complessivo delle due fonti considerate ([EROEI](#)).

**Non sono inoltre considerate** questioni molto tecniche quali:

- La dispacciabilità dell'elettricità, in particolare di quella prodotta dalla fonte fotovoltaica che è intermittente e non programmabile (sebbene accuratamente prevedibile); tuttavia, in materia vale la pena di menzionare il recente Rapporto della [IEA - International Energy Agency](#) dal titolo "[Harnessing Variable Renewables: a Guide to the Balancing Challenge](#)": vi si legge che in Europa, secondo le aree geografiche, può essere facilmente gestita, **nella situazione attuale delle reti**, una frazione di elettricità intermittente (eolico e fotovoltaico) compresa tra il 27% di Spagna e Portogallo insieme e il 63% della Danimarca; considerando la buona interconnessione della rete italiana, è verosimile che si possa gestire almeno il 40% di elettricità immessa da fonti intermittenti, e siamo ancora lontani da questo traguardo!
- L'effetto di "peak shaving" ([qui](#), [qui](#) e [qui](#)) prodotto dall'immissione di energia fotovoltaica, con la conseguente riduzione del prezzo d'equilibrio dell'elettricità nelle ore diurne e in particolare di picco della domanda, che altrimenti potrebbe essere considerato come un "valore aggiunto" da detrarre in qualche modo dal costo del kWh fotovoltaico.

## ELETTRICITA' DA FONTE NUCLEARE E MERCATO ELETTRICO

Per quanto riguarda l'elettricità da fonte nucleare, una [stima particolarmente avanzata e molto verosimile, nonché ancora sufficientemente cautelativa, è quella, recentissima, di Domenico Coiante](#) (ASPO Italia - Amici della Terra, già ENEA responsabile fonti rinnovabili), che aveva ripreso e affinato con un rigore straordinario le analisi e le stime già menzionate nel [post di Beppe Caravita](#).

**Coiante stima, per il costo del kWh nucleare, una "forchetta" compresa tra 8,1 e 9,4 centesimi di euro/kWh (cioè, tra 81 e 94 Euro/MWh),** valori che si collocano intorno alla media delle stime prodotte da vari autori nel corso degli ultimi quattro anni e che non risultano a tutt'oggi criticate o smentite (con argomenti altrettanto seri) da alcuno. Si assumerà quindi questa stima come la migliore in circolazione.

Con quale prezzo dell'energia elettrica sul mercato dovrebbe essere confrontato il costo dell'elettricità dalla fonte nucleare? Come dettagliatamente ricordato nell'[intervento di Coiante](#), le centrali nucleari non sono affatto "flessibili" e devono operare prevalentemente a regime costante, per cui contribuiscono essenzialmente, nel mercato elettrico, al "carico di base".

Le statistiche sintetiche per l'ultimo mese completamente analizzato, Aprile 2011, [rintracciabili sul sito del GME - Gestore dei Mercati Energetici](#), indicano un **prezzo medio di acquisto ("PUN") per il "carico di base" pari a 65,18 €/MWh (6,518 c€/kWh)**, risultato della media ponderata tra il prezzo nelle ore di picco (73,80 €/MWh) e nelle ore fuori picco (60,87 €/MWh).

Assumendo, com'è naturale, che l'elettricità nucleare sia generata allo stesso livello in tutte le ore del giorno, il prezzo di riferimento e confronto sarà proprio il primo di quelli sopra menzionati: **6,518 c€/kWh**.

**Anche assumendo quale stima del costo del kWh da fonte nucleare il valore minimo dell'intervallo stimato da Coiante (8.1 c€/kWh), questo risulta oltre il 24% maggiore rispetto al summenzionato prezzo medio di acquisto afferente al carico di base!**

## ELETTRICITA' DA FONTE FOTOVOLTAICA E MERCATO ELETTRICO

Per quanto riguarda l'elettricità da fonte fotovoltaica, la rapidissima evoluzione del mercato (volumi prodotti e installati) e delle tecnologie (costi di produzione e affidabilità, quindi necessità di manutenzione) ci ha indotto a produrre una nuova elaborazione finalizzata a determinare il prezzo minimo che un operatore

potrebbe offrire sul mercato elettrico (oggi è il [GSE - Gestore dei Servizi Energetici](#) a prelevare tutta l'energia fotovoltaica e a offrirla sul mercato).

Si assumerà implicitamente che l'investimento nelle infrastrutture fotovoltaiche sia sufficientemente "tutelato" nella prima fase (per esempio attraverso incentivazioni in conto energia o in conto interessi), in quanto la frazione largamente maggioritaria dell'investimento è ovviamente prodotta all'inizio, in una visione di sistema a lungo termine in cui le incentivazioni iniziali siano completamente riassorbite nel corso della vita utile degli impianti.

Si trascureranno gli effetti dell'energia fotovoltaica, così come di quella nucleare, sulla formazione dei prezzi nel mercato elettrico, cosa che, proprio in particolare per la fonte fotovoltaica e come sopra e [altrove](#) ricordato, rappresenta un'astrazione piuttosto pesante; includere l'effetto di abbattimento del prezzo d'equilibrio dell'elettricità (PUN) nelle ore di picco della domanda a causa dell'immissione in rete (e autoconsumo) di energia fotovoltaica, che per altro nel mese di Aprile 2011 - di seguito considerato quale riferimento per il confronto tra costo dell'elettricità fotovoltaica (e nucleare) con il PUN - era già del tutto [evidente e molto significativo](#), comporterebbe probabilmente la necessità di "aumentare" il PUN medesimo fino al valore che avrebbe assunto in assenza di immissione di energia fotovoltaica, cioè di [almeno 1 c€/MWh](#), col risultato di avvalorare ancora di più, come si vedrà più avanti, i positivi risultati sulla competitività della fonte fotovoltaica nelle ipotesi e assunzioni di seguito formulate.

Non è, infine, da attendersi un "effetto prezzo" significativo sul complesso dell'elettricità offerta nel mercato elettrico dall'immissione in rete di elettricità dalla fonte nucleare, in quanto come già ricordato questa interesserebbe essenzialmente il carico di base e quindi "sostituirebbe" la generazione da impianti termoelettrici, come quelli a carbone e i più efficienti alimentati a gas naturale a ciclo combinato, i cui costi di generazione sono sensibilmente più bassi rispetto agli impianti "sostituiti" dall'elettricità fotovoltaica.

Quali sono state allora le assunzioni fondamentali delle stime del costo del kWh fotovoltaico?

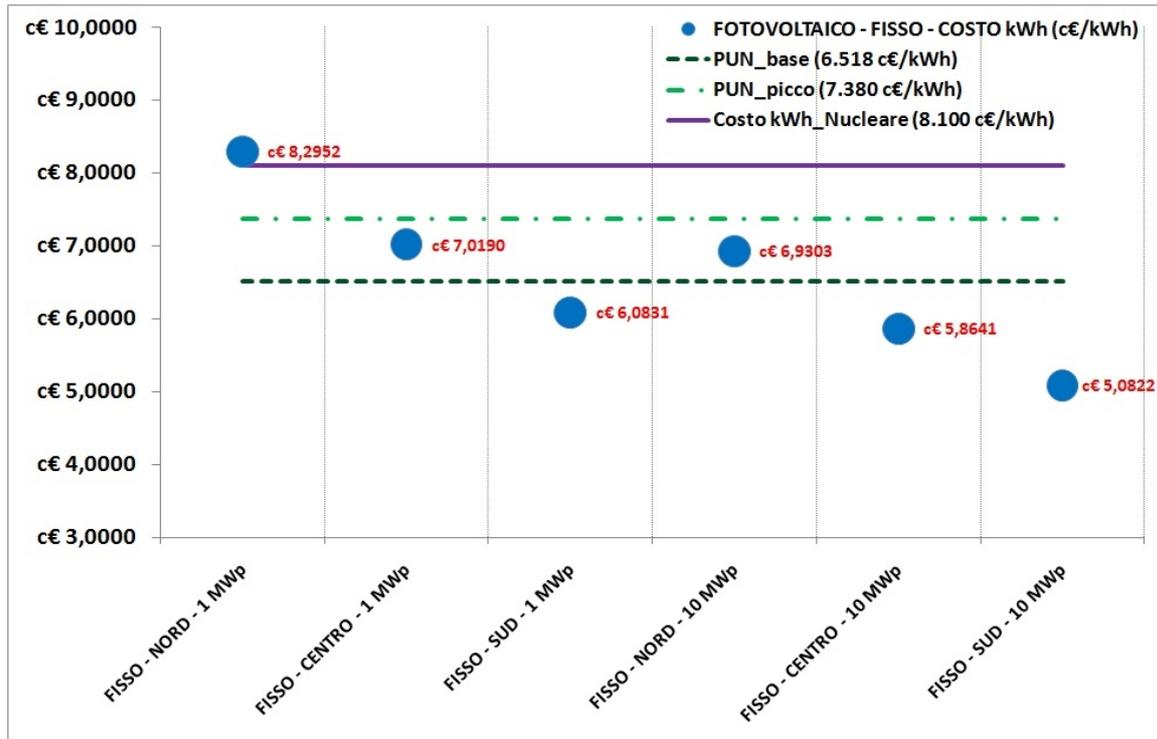
- Sono stati considerati soltanto **impianti "utility scale"** e in particolare, per semplicità, di **potenza 1 MWp e 10 MWp**, collocati su terreno e montati sia su strutture fisse sia su inseguitori solari biassiali;
- Si è assunta una **vita media dell'impianto fotovoltaico pari a 40 anni**, coerentemente con quanto dichiarato dal [A.D. di Ecoware Leopoldo Franceschini](#) nel già menzionato [post di Beppe Caravita](#), nonché con le [osservazioni scientifiche di Domenico Coiante](#);

- Si è assunto un **decremento realistico dell'efficienza fotovoltaica pari a 0,5% all'anno**, ancora in base alle [osservazioni scientifiche di Domenico Coiante](#);
- Si è assunto un **tasso d'inflazione medio annuale, per tutto il periodo, pari a 2,5%**, coerentemente con quanto osservato negli ultimi anni fino a oggi;
- Si è assunta una **produzione media annuale**, per mezzo di impianti fotovoltaici ottimizzati sia come orientamento al sud sia come inclinazione, montati su **strutture fisse**, pari a **1.100 kWh/kWp al nord Italia, a 1.300 kWh/kWp al centro Italia, a 1.500 kWh/kWp al sud Italia**, in linea con la conoscenza comune delle produzioni reali;
- Si è assunto un **incremento di produzione per mezzo di sistemi a inseguimento solare biassiale, rispetto a sistemi fissi, pari al 45%**, in linea con le dichiarazioni delle case costruttrici e con le osservazioni reali (per es. comunicazione personale di [Mario Ferrucci, Devices Srl](#));
- Si è assunto un **periodo di 20 anni per la restituzione del capitale necessario all'investimento iniziale** (sebbene nella nuova visione di lungo termine tale periodo possa essere anche superiore, si è preferito rimanere aderenti agli standard correnti);
- Si è assunto un **tasso d'interesse per la restituzione del suddetto capitale pari al 5%**, in linea con i tassi correntemente praticati;
- Per quanto riguarda i **costi "chiavi in mano" degli impianti**, si sono assunti i valori dichiarati nel [post di Beppe Caravita](#) (per altro confermati dalla conoscenza personale dell'autore della presente nota): **per i sistemi a inseguimento solare biassiale, 2.500 Euro/kWp per impianti di potenza 1 MWp e 2.200 Euro/kWp per impianti di potenza 10 MWp**, mentre **per i sistemi montati su strutture fisse si è assunto un costo pari al 80% di quello relativo, a parità di potenza, ai sistemi a inseguimento**;
- Si è assunto un **costo annuale di manutenzione ordinaria e straordinaria, comprensiva della sostituzione degli inverter con frequenza media di 10 anni, in misura pari allo 0,70% del costo d'investimento iniziale, rivalutabile annualmente al tasso d'inflazione**, in linea con quanto dichiarato nel [post di Beppe Caravita](#) (per altro confermato dalla conoscenza personale dell'autore della presente nota), quindi evidentemente maggiore per i sistemi a inseguimento;
- Si è assunto un **costo annuale di assicurazione "full risk" in misura pari allo 0,60% del costo d'investimento iniziale, costante in moneta corrente**, in linea con l'esperienza comune e la conoscenza personale dell'autore della presente nota e quindi evidentemente maggiore per i sistemi a inseguimento;

- Si è assunta una **occupazione di terreno pari a 2,3 ettari/MWp per i sistemi montati su strutture fisse, e pari a 4 ettari/MWp per i sistemi a inseguimento solare**, coerentemente con l'esperienza progettuale comune e anche, per i sistemi a inseguimento, con quanto dichiarato dalle case costruttrici;
- Si è assunto un **costo annuale afferente ai "canoni di superficie" corrisposti per il terreno occupato nella misura di 1.000 Euro/ettaro, rivalutabile annualmente al tasso d'inflazione**: tale valore è significativamente inferiore rispetto agli standard di mercato applicati almeno fino alla vigenza del [Terzo Conto Energia](#) fotovoltaico, riferendosi piuttosto a una situazione di equilibrio e di mercato sul lungo periodo (e comunque ancora generalmente e decisamente superiore rispetto ai valori degli affitti per uso agricolo per i terreni di minore pregio);
- E' stata inclusa nelle simulazioni finanziarie l'imposta di registro sui canoni di superficie, per tutta la durata di 40 anni, pari al 18% dei canoni cumulati;
- Sono stati inclusi **ulteriori costi a copertura di varie attività accessorie** quali guardiania, eventuale manutenzione delle opere di mitigazione paesaggistica, ecc, stimati nella misura cautelativa (per eccesso) di **15.000 Euro/anno per impianti di potenza 1 MWp e di 60.000 Euro/anno per impianti di potenza 10 MWp, rivalutabili annualmente al tasso d'inflazione**;
- E' stato infine adottato un **tasso di attualizzazione dei costi sostenuti nel tempo pari al 5%**, coerente con la rivalutazione media di capitali importanti destinati a impieghi a basso rischio (si sarebbe potuto adottare il più favorevole tasso "industriale" del 8%, per cui la scelta è da considerarsi del tutto cautelativa).

A questo punto, **il costo del kWh fotovoltaico è stato stimato semplicemente dividendo i costi totali attualizzati per la produzione complessiva nel corso della vita degli impianti.**

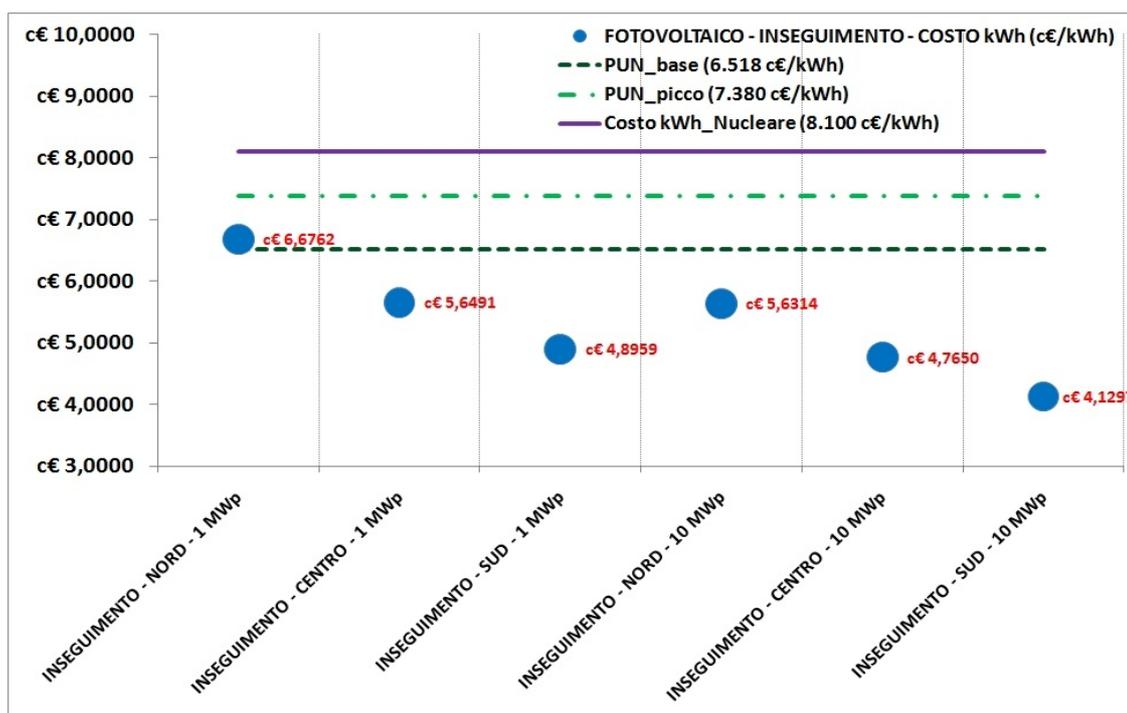
I risultati sono illustrati nei grafici seguenti, relativi rispettivamente a impianti fotovoltaici montati su supporti fissi e su inseguitori solari biassiali. In ciascun grafico, le linee orizzontali in colore verde delimitano i valori del [prezzo d'acquisto medio dell'elettricità nel Mercato Elettrico nel mese di Aprile 2011](#) ("PUN") afferenti alla **media del carico di base (valore inferiore, "PUN\_base", pari a 6,518 €/kWh)** e alla **media del picco (valore superiore, "PUN\_picco", pari a 7,380 €/kWh)**, quindi i termini di **confronto con l'elettricità da fonte fotovoltaica, ovviamente erogata in netta prevalenza nelle ore - diurne - in cui la domanda di elettricità è maggiore**, mentre la linea orizzontale in colore viola rappresenta il **valore minimo (8,1 €/kWh) del costo del kWh da fonte nucleare.**



Per maggiore chiarezza, i risultati sono anche riassunti di seguito:

- **FOTOVOLTAICO - SISTEMA SU SUPPORTI FISSI - COSTO DEL kWh**

- o NORD ITALIA - POTENZA 1 MWp: 8,2952 c€/kWh
- o CENTRO ITALIA - POTENZA 1 MWp: 7,0190 c€/kWh
- o SUD ITALIA - POTENZA 1 MWp: 6.0831 c€/kWh
- o NORD ITALIA - POTENZA 10 MWp: 6,9303 c€/kWh
- o CENTRO ITALIA - POTENZA 10 MWp: 5,8641 c€/kWh
- o SUD ITALIA - POTENZA 10 MWp: 5.0822 c€/kWh



Per maggiore chiarezza, i risultati sono anche riassunti di seguito:

- **FOTOVOLTAICO - SISTEMA SU INSEGUITORI SOLARI BIASSIALI - COSTO DEL kWh**
  - NORD ITALIA - POTENZA 1 MWp: 6,6762 c€/kWh
  - CENTRO ITALIA - POTENZA 1 MWp: 5,6491 c€/kWh
  - SUD ITALIA - POTENZA 1 MWp: 4.8959 c€/kWh
  - NORD ITALIA - POTENZA 10 MWp: 5,6314 c€/kWh
  - CENTRO ITALIA - POTENZA 10 MWp: 4,7650 c€/kWh
  - SUD ITALIA - POTENZA 10 MWp: 4.1297 c€/kWh

## **CONFRONTI BIBLIOGRAFICI E CONCLUSIONI**

Mentre per il costo dell'elettricità dalla fonte nucleare, come sopra esposto, si assumerà quale migliore stima quella, recentissima e già ampiamente ricordata, effettuata da [Domenico Coiante](#), che riprende anche tutta la letteratura precedente, la stima del costo dell'elettricità dalla fonte fotovoltaica è stata oggetto di valutazioni anche molto diverse tra loro.

L'evoluzione rapidissima della relativa tecnologia e soprattutto del mercato fotovoltaico, che ha portato a una notevole riduzione dei costi d'investimento e a un abbattimento dei costi di manutenzione anche per gli apparati relativamente più complessi come gli inseguitori solari biassiali, induce a considerare, in funzione comparativa con le stime ottenute nel presente

intervento, soltanto i più recenti lavori in materia. Per gli scopi del presente intervento, si considererà un solo riferimento di letteratura molto recente, riservando a eventuali successivi approfondimenti l'analisi di ulteriore letteratura.

Nel lavoro di [Gowrisankaran et al.](#), dell'Università dell'Arizona (marzo 2011), è stimato un costo di generazione da impianti fotovoltaici "utility-scale" intorno a 13,61 c\$/kWh, cioè al cambio corrente intorno a **9,7 c€/kWh**.

Nel medesimo lavoro, le ipotesi di base erano le seguenti:

- Radiazione solare intorno a 2.400 kWh/m<sup>2</sup>, circa il 25% in più rispetto al sud Italia e il 50% in più rispetto al centro Italia;
- Produzione annuale di un impianto fotovoltaico montato su supporti fissi e collocato su terreno intorno a 2.022 kWh/kWp, intermedia tra la produzione di un impianto fotovoltaico montato su inseguitori biassiali al centro e al sud Italia;
- Costo d'investimento per un impianto fotovoltaico montato su supporti fissi intorno a 5.000 \$/kWp, cioè intorno a 3.570 €/kWp, quindi circa il 60% in più rispetto a quanto assunto nel presente intervento per una installazione fotovoltaica di potenza 10 MWp a inseguimento solare biassiale;
- Ciclo di vita dei generatori fotovoltaici pari a 25 anni, contro i 40 anni assunti nel presente intervento (37,5% in meno).

Se, quindi, in termini di produzione il confronto del dato di costo tratto dal lavoro di riferimento (9,7 c€/kWh) dovrebbe essere confrontato con i valori afferenti a impianti a inseguimento solare biassiale al sud Italia (ca. 4,1 c€/kWh) e al centro Italia (ca. 4,8 c€/kWh), considerando che:

- Il costo d'investimento incide per circa il 55% dei costi complessivi nel ciclo di vita assunto alla base dei nostri calcoli, per cui una maggiorazione del costo d'investimento del 60% incide per circa il 33% (di maggiorazione) sul "numeratore" del rapporto costi/produzione;
- La produzione dal 26° al 40° anno rappresenta circa il 35% della produzione totale, diminuendo della stessa frazione il "denominatore" del rapporto costi/produzione;

Per riportare il valore stimato da [Gowrisankaran et al.](#), (9,7 c€/kWh) verso le ipotesi assunte nel nostro lavoro occorre moltiplicare tale valore per circa 0,5, ottenendo quindi circa **4,85 c€/kWh** che è di poco superiore al valore del costo del kWh fotovoltaico che abbiamo stimato per il centro Italia, confermando quindi sostanzialmente l'accuratezza - nell'ambito delle ipotesi e assunzioni dettagliatamente illustrate - delle stime effettuate!

**In Conclusione, i risultati, crediamo, si commentano da soli: il costo dell'energia fotovoltaica, nelle ipotesi e nella "visione strategica" sopra esaustivamente illustrate, è tale che la fonte fotovoltaica può già considerarsi generalmente del tutto competitiva con la generazione termoelettrica tradizionale - a differenza della fonte nucleare - in particolare per i sistemi a inseguimento solare biassiale di potenza intorno a 10 MWp, che godono di un vantaggio finanziario stimabile intorno al 20% rispetto ai sistemi di analoga potenza montati su strutture fisse e la cui produzione elettrica, in tutta Italia, può essere offerta a un costo significativamente inferiore a quello corrente del mercato elettrico!**

**Le conseguenze in termini di auspicabile regolamentazione anche in termini autorizzatori sono talmente ovvie che non meriterebbero neppure una menzione esplicita, se non che il percorso intrapreso a tutti i livelli dell'amministrazione statale e locale, finalizzato a vietare sistematicamente installazioni fotovoltaiche di dimensioni medio-grandi su terreni agricoli, è esattamente l'opposto di quanto sarebbe necessario per ottenere la produzione di energia elettrica al costo più basso possibile!**