

Pannelli fotovoltaici e inquinamento termico

Francesco Aliprandi

Marzo 2010

<http://www.aspoitalia.it/>

1 Introduzione

Recentemente si è diffusa l'idea che l'installazione di pannelli fotovoltaici, a causa del loro colore scuro che può implicare una diminuzione dell'albedo, possa in qualche modo portare ad un aumento della temperatura atmosferica a livello globale e locale; addirittura si ipotizza che la maggiore energia assorbita in questo modo possa essere superiore a quella che verrebbe emessa da centrali termoelettriche convenzionali che producano la stessa quantità di energia elettrica dei pannelli. Queste poche righe hanno lo scopo di fare un po' di chiarezza sulla questione, con una trattazione che si basa su quanto è già disponibile nella letteratura scientifica.

2 Il problema della variazione di albedo

Il valore medio della radiazione elettromagnetica solare che giunge all'esterno dell'atmosfera terrestre è noto con buona approssimazione da misure satellitari: nel IV rapporto dell'IPCC (figura a pag.96 di [1]) viene indicato in 342 W/m^2 ; il termine *medio* sta a significare che nel calcolo si è già tenuto conto della rotazione della Terra e dell'angolo (variabile) formato dalla normale alla superficie con la retta di propagazione della radiazione.

Questo flusso interagisce con l'atmosfera e viene in parte riflesso dalle nuvole, dagli aerosol e dai gas atmosferici, in parte assorbito dall'atmosfera e solo il rimanente giunge al suolo, circa 168 W/m^2 . Una frazione della radiazione che arriva al suolo viene riflessa, e al rapporto fra la quantità riflessa e quella incidente si dà il nome di riflettività spettrale; quando ci si riferisca a sorgenti di energia elettromagnetica concentrata prevalentemente nel visibile, come è il caso del Sole, e si consideri l'intero spettro della radiazione (cioè il valore mediato su tutte le lunghezze d'onda), si usa il termine *albedo*, per la quale si riportano alcuni valori caratteristici in tabella 1 ricavati da varie fonti.

I valori bassi, che indicano una superficie scura in grado di riflettere una minore percentuale della radiazione incidente, sono nettamente dominanti: infatti l'albedo della Terra nel suo complesso è valutata pari a 0.30.

I pannelli fotovoltaici sono trattati in superficie in modo da minimizzare la quantità di radiazione riflessa, e presentano valori dell'albedo piuttosto bassi: in laboratorio si può scendere fino all'1%, ma valori più realistici ricavabili da installazioni reali si aggirano attorno al 5% [2]; alcuni

Superficie	albedo
Erba	0.16 ÷ 0.26
Foresta di conifere (in estate)	0.08 ÷ 0.15
Ghiaccio marino	0.30 ÷ 0.40
Neve fresca	0.80 ÷ 0.90
Sabbia	0.15 ÷ 0.45
Terreno incolto	0.25
Asfalto	0.04 ÷ 0.12
Calcestruzzo (nuovo)	0.55
Calcestruzzo (vecchio)	0.10 ÷ 0.35
Mattoni	0.20 ÷ 0.40
Tegole	0.10 ÷ 0.35
Tetto catramato o con ghiaia	0.08 ÷ 0.18
Tetto in lamiera ondulata	0.10 ÷ 0.16

Tabella 1: valori dell'albedo per varie superfici.

autori hanno misurato tuttavia valori molto maggiori, fino al 20% [3]. Per la radiazione riflessa vale ovviamente l'espressione

$$R_{rifl} = I_s \alpha_{sup} \quad (1)$$

nella quale I_s è la quantità di radiazione incidente al suolo e α_{sup} l'albedo della superficie, ma di questo flusso una parte viene riassorbito dall'atmosfera nel suo percorso verso lo spazio. Tale frazione vale circa il 23%, e si calcola, sempre in base alla figura a pag.96 di [1], dal rapporto fra il flusso assorbito dall'atmosfera (67 W/m^2) e il totale che potrebbe essere assorbito (295 W/m^2 , cioè $67 + 168 + 30 + 30$); in questo modo la parte che sfugge si scrive come

$$R_{exit} = I_s \alpha_{sup} (1 - \rho) \quad (2)$$

Per valutare l'inquinamento termico in presenza di due superfici diverse è necessario considerare, con riferimento alla 2, la sola differenza fra l'albedo preesistente nel luogo di installazione e quella dei pannelli; il flusso che non raggiunge lo spazio e rimane intrappolato, che si interpreta come un forcing radiativo, si potrà in definitiva esprimere come

$$R = I_s (\alpha_{sup} - \alpha_{pann}) (1 - \rho) \quad (3)$$

essendo α_{pann} l'albedo dei pannelli; dalla tabella 1 si nota che il primo termine fra parentesi è sempre positivo con il valore di α_{pann} ipotizzato. Il valore di I_s andrebbe misurato localmente, poiché può risultare anche molto diverso dalla media riportata in precedenza: a Stoccarda ad esempio si hanno 129 W/m^2 , a Nairobi 231 W/m^2 ; un valore mediato su 7 grandi città riportato in [2] è 183 W/m^2 . Vale la pena notare che lo stesso ragionamento andrebbe a rigore applicato al calcolo del coefficiente ρ , ma con problemi di misurazione insormontabili.

3 Inquinamento termico su scala globale

Immaginiamo di voler sostituire la potenza elettrica prodotta da una centrale convenzionale (a gas naturale, olio combustibile, carbone o anche nucleare) con quella ricavabile dai pannelli

fotovoltaici¹. Ovviamente l'intero calore ottenuto dalla combustione viene rigettato nell'ambiente, e la potenza utilizzabile è legata a quella totale liberata nel processo: se indichiamo con η_{th} il rendimento della centrale, si scrive

$$P_{utile,th} = \eta_{th} P_{tot} \quad (4)$$

quindi la frazione che chiamiamo inquinamento termico (da centrali termoelettriche) si potrà scrivere

$$P_{inq,th} = \frac{P_{utile}}{\eta_{th}} \quad (5)$$

e si vede chiaramente che rendimenti migliori implicano un minore inquinamento.

Per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici, le potenze incidenti sui pannelli e sulle superfici originarie si possono scrivere rispettivamente

$$P = I_s A_s (1 - \alpha_{pann}) \quad (6a)$$

$$P_0 = I_s A_s (1 - \alpha_{sup}) \quad (6b)$$

essendo A_s l'area presa in esame. Dato che solo una parte della potenza P indicata nella 6a viene convertita in elettricità, la potenza utile dovrebbe essere ricavabile moltiplicando quell'espressione per il rendimento dell'impianto fotovoltaico, η_{pv} ; tuttavia le efficienze vengono misurate con riferimento all'intera potenza incidente, inglobando in modo implicito il fattore $(1 - \alpha_{pann})$, e quindi si scriverà

$$P_{utile,pv} = I_s A_s \eta_{pv} \quad (7)$$

La differenza fra la 6b e la 6a misura la potenza aggiuntiva che viene liberata nell'ambiente, ma in base a quanto discusso nel paragrafo precedente l'espressione va moltiplicata per il termine $(1 - \rho)$, e quindi, grazie anche alla 7 si ha

$$\begin{aligned} P_{inq,pv} &= (P - P_0)(1 - \rho) \\ &= I_s A_s [(1 - \alpha_{pann}) - (1 - \alpha_{sup})](1 - \rho) \\ &= \frac{P_{utile,pv}(\alpha_{sup} - \alpha_{pann})(1 - \rho)}{\eta_{pv}} \end{aligned} \quad (8)$$

Si può infine ottenere un'equazione che permette di studiare quando il fotovoltaico produca una potenza termica inquinante superiore a quella delle centrali termoelettriche sottraendo la 5 dalla 8 e adimensionalizzando con riferimento alla potenza utile

$$\frac{\Delta P}{P_{utile}} = \frac{P_{inq,pv} - P_{inq,th}}{P_{utile}} = \left[\frac{(\alpha_{sup} - \alpha_{pann})(1 - \rho)}{\eta_{pv}} - \frac{1}{\eta_{th}} \right] \quad (9)$$

Il termine η_{pv} va inteso come un rendimento complessivo dell'impianto, ben diverso dai valori dell'efficienza delle singole celle che vengono ampiamente pubblicizzati dai produttori o che si possono reperire in letteratura [5]. Senza scendere troppo nel dettaglio, bisognerebbe conoscere

¹Il procedimento seguito in questo paragrafo ricalca in parte quanto esposto in [4], ma tiene esplicitamente conto dell'albedo dei pannelli fotovoltaici senza assumere che sia nulla.

- la perdita di rendimento provocata dalla realizzazione di moduli a partire da celle che presentano sempre piccole differenze nelle caratteristiche elettriche;
- la minore superficie effettiva derivante dal montaggio dei moduli;
- le perdite derivanti dall'utilizzo a temperature superiori a quella standard di misura ($25^{\circ}C$);
- il rendimento delle apparecchiature che convertono la corrente continua in alternata (inverter);
- ulteriori riduzioni dovute ad esempio all'accumulo di sporcizia sui moduli, invecchiamento delle celle e fermi imprevisti dell'impianto.

L'insieme dei fattori deve esser valutato caso per caso, ma un rendimento indicativo può essere assunto pari al 10%. Questo valore risulta confermato da misurazioni eseguite su impianti di varia taglia in condizioni di funzionamento reale [6, 7, 8].

Il rendimento del parco termoelettrico nazionale è ricavabile dai dati statistici messi a disposizione da Terna [9], in particolare dal consumo specifico espresso in kcal/kWh; negli ultimi anni è aumentato in modo abbastanza regolare, e nel 2008 era pari al 44.5%.

Con questi dati è possibile valutare per quali valori dell'albedo originaria l'installazione dei pannelli causa un maggiore inquinamento termico: sarà sufficiente porre il termine fra parentesi quadre maggiore di zero e risolvere, ottenendo

$$\alpha_{sup} > \frac{\eta_{pv}}{0.77 \cdot \eta_{th}} + \alpha_{pv} = 0.34 \quad (10)$$

Osservando i valori in tabella 1 si può concludere che già ora, con rendimenti relativamente bassi per gli impianti fotovoltaici e fatti salvi luoghi di installazione molto particolari, non esiste alcun problema su scala globale derivante dai pannelli. Dato che l'albedo per un tetto difficilmente supera un valore pari a 0.25, sempre dalla 9 si può ricavare l'efficienza limite che dovrebbe avere un impianto installato in zone urbane per non provocare effetti di inquinamento termico; ponendo $\alpha_{sup} - \alpha_{pann} = 0.20$ e risolvendo, si ottiene $\eta_{pv} = 0.07$, valore che è davvero difficile non raggiungere.

4 Inquinamento termico su scala locale

Dato che l'installazione di pannelli causa praticamente in ogni circostanza una diminuzione dell'albedo, se anche a livello complessivo la quantità di calore che si dissipa rimane immutata si ha un trasferimento di flussi termici dal luogo in cui è presente la centrale termoelettrica a quello molto più esteso, a causa della bassa densità energetica, in cui si trovano gli impianti fotovoltaici; nel caso si tratti di centri urbani è lecito chiedersi se ciò possa aggravare il problema dell'isola di calore (UHI, Urban Heat Island), fenomeno ampiamente studiato già da tempo [10]. L'analisi è molto complessa, dovendosi procedere ad un bilancio energetico che si può scrivere, con riferimento ad esempio ad un tetto

$$SW_{\downarrow} - SW_{\uparrow} + LW_{\downarrow} - LW_{\uparrow} - Q_{conv} - Q_{cond} - Q_{lat} = C_{tetto} \frac{d}{dt} \left(\frac{T_{tetto} - T_{soffitto}}{2} \right) \quad (11)$$

essendo SW la radiazione sulle onde corte (visibile), LW quella su onde lunghe (infrarosso), Q il calore scambiato per convezione, conduzione o durante processi di cambio di stato (latente),

e C la capacità termica del tetto; in questa espressione appare esplicitamente non solo il tempo, ma anche la componente LW , perché dipende dalla temperatura del tetto (e dell'atmosfera) che ora sono variabili e non valori medi come considerato nel paragrafo precedente. La risoluzione della 11 prevede che ciascuno dei termini sulla sinistra venga esplicitato in funzione di variabili note o misurabili, come la temperatura del tetto o dell'aria, oppure la velocità del vento o ancora l'emissività della copertura.

Vista la complessità del problema è difficile stabilire cosa comporti realmente la presenza di pannelli fotovoltaici senza un'analisi dettagliata; sia che si tratti di moduli di tipo integrato, sia che vengano posti su di una struttura di sostegno, da un lato ci sarà un maggiore riscaldamento dell'aria nelle immediate vicinanze, ma anche una schermatura del tetto sottostante che quindi si troverà a temperature molto inferiori a quelle raggiungibili in pieno sole: di conseguenza si avrà un minore immagazzinamento di energia sotto forma di calore nelle strutture inferiori. In effetti, oltre al già citato studio [3] che ha trovato un effetto positivo dopo l'installazione degli impianti (risparmio nelle spese energetiche per il condizionamento degli edifici compreso fra il 3 e il 10% grazie alla schermatura), altri hanno valutato gli impatti positivi sia nel caso di pannelli posti a copertura di parcheggi al posto delle classiche tettoie [11], sia considerando pannelli integrati e i benefici derivanti a livello di microclima urbano [12]. Inoltre, sebbene esista un contributo al flusso di calore sensibile diurno compreso fra i 20 e i 40 W/m² [3] tale valore è molto inferiore a quello già esistente e dovuto all'utilizzo, ad esempio, di automobili e condizionatori; l'effetto sull'UHI risulta perciò trascurabile.

Sempre a livello locale è possibile cercare di ripristinare il valore originale dell'albedo delle coperture utilizzando vernici bianche riflettenti, anche se al momento i materiali richiedono una pulizia regolare per mantenere le caratteristiche nel tempo. Sembra quindi che anche in questo caso non ci sia un pericolo di inquinamento termico nonostante ragionamenti approssimativi potrebbero far pensare il contrario.

5 Conclusioni

La produzione di energia elettrica tramite impianti fotovoltaici può causare una variazione di albedo che, anche nelle peggiori ipotesi, non comporta una maggiore quantità di calore emessa rispetto a centrali termoelettriche, ma semmai una sua diversa distribuzione spaziale: il flusso da concentrato diventa distribuito su di una superficie molto ampia, e anche nel caso di installazione in centri urbani, dal confronto di questo contributo con quello totale di natura antropogenica già esistente, non sembra esista la possibilità di aggravare il problema dell'isola di calore.

In questo documento non si è poi discusso di un ulteriore vantaggio del fotovoltaico rispetto alle centrali a combustibili fossili, ossia la minore emissione di biossido di Carbonio; il CO₂ equivalente calcolato per i pannelli da analisi di tipo LCA [13] è infatti molto inferiore a quello derivante dalla combustione a parità di kWh prodotti durante la vita dell'impianto. Il forcing radiativo espresso tramite un'espressione del tipo

$$\Delta F = \sigma \ln \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (12)$$

dove σ è la sensibilità ad un raddoppio di concentrazione C (C_0 è il valore iniziale) può essere confrontato con quello derivante dalla variazione di albedo per varie ipotesi di sviluppo futuro; un'analisi accurata [2] mostra che l'installazione di impianti produrrebbe un forcing dovuto alla minore albedo circa 30 volte inferiore a quello causato dalle emissioni provenienti da centrali termoelettriche.

Appare ancor più giustificato concludere che i pannelli fotovoltaici non rappresentano un pericolo nei riguardi dell'inquinamento termico.

Riferimenti bibliografici

- [1] Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. *Climate Change 2007 - The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2007.
- [2] Gregory F. Nemet. Net radiative forcing from widespread deployment of photovoltaics. *Environ. Sci. Technol.*, (43 (6)):2173–2178, 2009.
- [3] Yutaka Genchi, Masako Ishisaki, Yukitaka Ohashi, Yukihiro Kikegawa, Hiroshi Takahashi, and Atsushi Inaba. Impacts of large-scale photovoltaic panel installation on the heat island effect in Tokyo.
- [4] Claude-Alain Roulet. Solar energy and global heat balance of a city. *Sol. Energy*, (70 (3)):255–261, 2001.
- [5] Martin A.Green, Keith Emery, Yoshihiro Hishikawa, and Wilhelm Warta. Solar cell efficiency tables (version 34). *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, (17):320–326, 2009.
- [6] Somchai Chokmaviroj, Rakwichian Wattanapong, and Yammen Suchart. Performance of a 500 kW_P grid connected photovoltaic system at Mae Hong Son Province, Thailand. *Renew. Energ.*, (31):19–28, 2006.
- [7] Jung Hun So, Young Seok Jung, Gwon Jong Yu, Ju Yeop Choi, and Jae Ho Choi. Performance results and analysis of 3 kW grid-connected pv systems. *Renew. Energ.*, (32):1858–1872, 2007.
- [8] Emmanuel Kymakis, Sofoklis Kalykakis, and Thales M. Papazoglou. Performance analysis of a grid connected photovoltaic park on the island of Crete. *Energ. Convers. Manage.*, (50 (3)):433–438, 2009.
- [9] Terna. Dati statistici sull'energia elettrica in Italia, 2008.
- [10] Ahmed Memon Rizwan, Leung Y.C. Dennis, and Chunho Liu. A review on the generation, determination and mitigation of Urban Heat Island. *J. Environ. Sci.*, (20 (1)):120–128, 2008.
- [11] Jay S. Golden, Joby Carlson, Kamil E. Kaloush, and Patrick Phelan. A comparative study of the thermal and radiative impacts of photovoltaic canopies on pavement surface temperatures. *Sol. Energy*, (81 (7)):872–883, 2007.
- [12] Wei Tian, Yiping Wang, Yiyang Xie, Danzhu Wu, Li Zhu, and Jianbo Ren. Effect of building integrated photovoltaics on microclimate of urban canopy layer. *Build. Environ.*, (42 (5)):1891–1901, 2007.
- [13] Vasilis M. Fthenakis, Hyung Chul Kim, and Erik Alsema. Emissions from photovoltaic life cycles. *Environ. Sci. Technol.*, (42 (6)):2168–2174, 2008.