

CONTENIMENTO DEL RISCALDAMENTO GLOBALE: CONFRONTO TRA SISTEMI PER IL CONTROLLO DELL'ALBEDO TERRESTRE E FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI

F. Cotana, F. Rossi, M. Filipponi, A. Nicolini, M. Amantini

¹CIRIAF, Università degli Studi di Perugia, Dipartimento di Ingegneria Industriale, Sezione di Fisica Tecnica,
Via G. Duranti 67, 06125, Perugia

SOMMARIO

L'incremento della temperatura media della Terra sia esso dovuto a cause naturali che antropiche è un fatto ormai condiviso da tutta la comunità scientifica. Le conseguenze dell'incremento della temperatura sono evidenti: innalzamento del livello degli oceani, scioglimento dei ghiacci, desertificazione, eventi meteorologici estremi, etc.. Le conseguenze sociali, economiche e politiche sono altrettanto preoccupanti. Studi recenti hanno stimato che l'entità dei danni prodotti dai cambiamenti ambientali da inizio secolo fino ad oggi è pari a quello delle due guerre mondiali messe insieme. Alla luce di tali considerazioni e delle allarmanti previsioni di crescita della temperatura nei prossimi decenni risulta quindi urgente l'individuazione di una soluzione tecnologica ambientalmente compatibile che consenta di contrastare il riscaldamento globale nel breve termine.

Una soluzione di facile realizzazione tecnica e dai costi contenuti potrebbe essere quella di modificare artificialmente l'albedo della superficie terrestre mediante la realizzazione di superfici "bianco riflettenti" con coefficiente di riflessione maggiore rispetto a quello della superficie terrestre nelle lunghezze d'onda dello spettro solare. Nel presente lavoro viene effettuato un confronto tecnico-economico tra il sistema proposto e le principali tecnologie di produzione di energia elettrica e termica da fonti energetiche rinnovabili al fine di valutarne l'efficacia in termini di costo di riduzione delle emissioni di CO_{2eq}.

INTRODUZIONE

La temperatura media globale dell'atmosfera terrestre è strettamente collegata alle caratteristiche radiative della superficie della Terra. La porzione di radiazione solare assorbita dalla superficie ed il conseguente riscaldamento prodotto da tale assorbimento costituisce infatti, insieme all'effetto serra indotto dall'atmosfera, il meccanismo alla base del mantenimento della temperatura sulla superficie terrestre su valori idonei all'esistenza della vita animale e vegetale.

La modifica dell'albedo mediante l'impiego di superfici con coefficiente di riflessione maggiore di quello della superficie terrestre consentirebbe di ridurre la porzione di radiazione solare assorbita dalla Terra e conseguentemente di ridurre la temperatura media globale.

La quantificazione dell'efficacia di una superficie riflettente è stata effettuata mediante un innovativo modello matematico brevettato [1], basato sul bilancio energetico tra volta celeste, atmosfera e superficie terrestre. La correlazione tra riduzione della temperatura e diminuzione della concentrazione in atmosfera di gas serra è stata effettuata ipotizzando che l'incremento di temperatura registrato negli ultimi 50 anni sia imputabile esclusivamente alla variazione di concentrazione di CO_{2eq} verificatesi nel medesimo intervallo temporale. Considerando per la radiazione solare incidente al di fuori dell'atmosfera un valore medio di 343 W/m² ed ipotizzando per la superficie riflettente un coefficiente di riflessione della radiazione solare pari a 0,9, si ottiene che ogni m² di superficie installata compensa l'emissione in atmosfera di circa 52 kg di CO_{2eq}.

Nel presente lavoro il costo di "abbattimento" della concentrazione di gas serra mediante superfici riflettenti è stato confrontato con quello delle principali fonti energetiche

rinnovabili. Le emissioni evitate da ciascuna tipologia di fonte energetica rinnovabile sono state calcolate come differenza con le emissioni prodotte per la generazione di 1 kWh elettrico o termico dalla migliore tecnologia operante con fonti tradizionali. Il costo di abbattimento è stato quindi calcolato come rapporto tra la differenza di costo di generazione dell'unità energetica tra fonte rinnovabile e tradizionale ed il valore delle corrispondenti emissioni evitate.

Nella valutazione del costo di abbattimento delle emissioni per mezzo delle diverse soluzioni tecnologiche non si è tenuto conto degli eventuali ricavi derivanti dalla vendita dell'energia elettrica prodotta ma è stata adottata l'ipotesi semplificativa che l'energia elettrica o termica generata venga tutta consumata dall'utilizzatore finale.

Le tecnologie operanti con fonti energetiche rinnovabili prese a riferimento sono i pannelli solari per la produzione di energia termica, i pannelli fotovoltaici, gli impianti eolici e gli impianti idroelettrici.

EMISSIONI DELLE FONTI ENERGETICHE RINNOVABILI

Pannelli fotovoltaici

Le prestazioni di un pannello fotovoltaico in termini di produzione di energia elettrica e di emissioni di CO_{2eq} connesse alle fasi di realizzazione, manutenzione e smaltimento del pannello stesso cambiano notevolmente in funzione della tipologia di silicio impiegata per la sua realizzazione: amorfo, monocristallino, policristallino.

Le celle in silicio *amorfo* sono la tipologia con il minor costo di produzione (circa 380 €/m²) e con il valore più basso delle emissioni (68 gCO_{2eq}/kWh_e); per contro la loro efficienza

energetica (valore dell'efficienza del modulo fotovoltaico variabile tra il 6 ed il 9 %) risulta molto più bassa sia delle celle in silicio *monocristallino* (valore dell'efficienza del modulo fotovoltaico variabile tra il 15 ed il 17 %) che di quelle in silicio *policristallino* (valore dell'efficienza del modulo fotovoltaico variabile tra il 12 ed il 14 %).

Le emissioni di CO_{2eq} connesse alle fasi di realizzazione, manutenzione e smaltimento di ciascuna tipologia di pannello sono state ricavate a partire dal consumo di energia primaria necessario a produrre un pannello di 1 kW di picco [2-7]. Le emissioni di CO_{2eq} corrispondenti a tale consumo sono state quindi distribuite lungo tutto l'arco di vita medio del pannello (25 anni). La corrispondenza tra kW di picco e kWh è stata infine calcolata prendendo a riferimento il coefficiente zonale di conversione corrispondente ad una regione del centro-nord Italia (1100 kWh_e/kW_p anno).

Alle emissioni relative alle fasi di produzione, gestione, manutenzione e smaltimento del pannello andrebbero aggiunte quelle corrispondenti al riscaldamento della temperatura media radiante prodotto dal maggiore coefficiente di assorbimento della superficie del pannello rispetto alla superficie terrestre. Tale contributo può essere tuttavia considerato con buona approssimazione trascurabile. Ipotizzando infatti per tale superficie un coefficiente di assorbimento pari a 0,9 l'installazione di 1 m² di pannello produce nell'arco dell'intera vita un riscaldamento analogo a quello prodotto dall'immissione in atmosfera di circa 4 kg di CO_{2eq} (0,14 gCO_{2eq}/kWh) [1].

Le celle in silicio monocristallino e policristallino, a fronte di efficienze energetiche più elevate, presentano un costo di produzione maggiore (rispettivamente di circa 600 e 650 €/m²) ed un valore delle emissioni relative alle fasi di realizzazione delle stesse (rispettivamente di 173 e 111 gCO_{2eq}/kWh_e) più elevato rispetto alla tipologia in silicio amorfo.

Le centrali a ciclo combinato, con un valore medio delle emissioni di 500 gCO_{2eq}/kWh_e, costituiscono allo stato attuale il sistema di produzione di energia elettrica da combustibili fossili con il minore impatto ambientale.

Prendendo a riferimento il sistema suddetto, le emissioni evitate da un pannello fotovoltaico risultano quindi pari a 432 gCO_{2eq}/kWh_e per la tipologia in silicio amorfo, 327 gCO_{2eq}/kWh_e per la tipologia in silicio monocristallino e 389 gCO_{2eq}/kWh_e per la tipologia in silicio policristallino.

Solare termico (Collettore piano)

Le prestazioni in termini di produzione di energia termica di un collettore solare piano, analogamente a quanto accade per i pannelli fotovoltaici, dipendono fortemente dalla latitudine di installazione dell'impianto. In una località dell'Italia centrale con orientazione a sud ed angolo di inclinazione rispetto al piano orizzontale pari a 30°, si ottiene una resa di circa 700 kWh/m² anno. Nell'ipotesi di produrre tale quantitativo di calore con una caldaia alimentata a gas naturale con P.C.I. pari a 38 MJ/Nm³ (rendimento sistema caldaia/impianto pari all'82%) il volume di combustibile risulta pari a circa 80 Nm³/anno. In termini di CO₂ questo si traduce in un risparmio di circa 146 kgCO₂/anno (211,5 gCO₂/kWh_t).

Al valore delle emissioni evitate così trovato vanno tuttavia sottratte le emissioni corrispondenti al riscaldamento della temperatura media radiante prodotto dal maggiore coefficiente di assorbimento della superficie del collettore rispetto alla superficie terrestre e le emissioni relative alle fasi di realizzazione, manutenzione e smaltimento del pannello.

Ipotizzando per la superficie del collettore piano un coefficiente di assorbimento pari a 0,95, l'installazione di 1 m² di pannello produce un riscaldamento analogo a quello prodotto dall'immissione in atmosfera di circa 6 kg di CO_{2eq}. Le emissioni relative all'intero ciclo di vita del collettore (15 anni) sono quantificabili in circa 340 kgCO_{2eq}/m² (32 gCO_{2eq}/kWh_t). Le emissioni evitate da un collettore solare piano risultano quindi pari a circa 179,5 gCO_{2eq}/kWh_t.

Impianto eolico

Le emissioni di CO_{2eq} di una centrale eolica relative al ciclo di vita (costruzione e trasporto dei materiali e dei componenti, gestione e manutenzione dell'impianto, smaltimento) ammontano a circa 16,9 gCO_{2eq}/kWh_e [8]. Le emissioni evitate risultano quindi pari a 483,1 gCO_{2eq}/kWh_e.

Impianto idroelettrico

Le emissioni di CO_{2eq} di una centrale idroelettrica relative al ciclo di vita dell'impianto variano in funzione della tipologia dell'impianto stesso: a deflusso regolato (a bacino), ad accumulo o a serbatoio oppure ad acqua fluente. Per le ultime due tipologie le emissioni di gas serra possono essere considerate pressoché equivalenti e pari a 15 gCO_{2eq}/kWh_e. Negli impianti a deflusso regolato un contributo significativo alle emissioni è dovuto ai fenomeni di decomposizione delle sostanze organiche a seguito del riempimento del bacino artificiale; in questo caso le emissioni possono raggiungere anche valori dell'ordine di 50 gCO_{2eq}/kWh_e.

Per semplicità di trattazione sono stati presi in esame esclusivamente impianti ad accumulo ed a serbatoio. Le emissioni evitate da tale tipologia di impianti risultano pari a 485 gCO_{2eq}/kWh_e.

Superficie bianco riflettente

Nell'ipotesi di realizzare una superficie "bianco riflettente" mediante la semplice deposizione di uno o più strati di pittura, i processi che determinano le maggiori emissioni di CO_{2eq} sono quelli relativi alla produzione della vernice stessa ed in particolare dei pigmenti inorganici che ne determinano il colore. Per la vernice bianca il pigmento impiegato è il biossido di titanio. Se si suppone di impiegare idropittura con effetto coprente con contenuto di TiO₂ dal 6 al 10% in peso (resa superficiale 3,7 m²/kg), il quantitativo di biossido di titanio contenuto in 1 m² di superficie risulta pari a 27 g. Considerando che il processo di produzione di biossido di titanio comporta 4 mgCO_{2eq}/gTiO₂, le emissioni connesse alla realizzazione di 1 m² di superficie bianca risultano pari a 0,11 gCO_{2eq}. Le emissioni aumentano se viene impiegata pittura bianca in resina all'acqua del tipo utilizzato per la realizzazione della segnaletica stradale orizzontale (contenuto TiO₂ pari al 20% in peso, resa superficiale 1,2 m²/kg). Il contenuto di biossido di titanio contenuto in 1 m² di superficie diventa pari a 166 g con un valore delle emissioni di 0,66 gCO_{2eq}/m². Una superficie bianca con coefficiente di riflessione della luce solare di 0,9, installata in Italia, compensa durante il suo ciclo di vita l'immissione in atmosfera di circa 52 kgCO_{2eq}/m². Ipotizzando per detta superficie un ciclo di vita di 40, le emissioni evitate da una superficie bianco riflettente risultano quindi pari a 1300 gCO_{2eq}/m² anno. I valori delle emissioni evitate da ciascuna delle tecnologie precedentemente esaminate sono riportati nelle tabelle seguenti.

Tabella 1: Emissioni di CO_{2eq} evitate grazie all'impiego di ciascuna fonte rinnovabile.

Tecnologia	Emissioni evitate
	gCO _{2eq} /kWh
Fotovoltaico silicio amorfo	432
Fotovoltaico policristallino	389
Fotovoltaico monocristallino	327
Solare termico (collettore piano)	179,5
Eolico	483,1
Idroelettrico	485

Tabella 2: Emissioni di CO_{2eq} evitate grazie all'impiego della tecnologia bianco riflettente.

Tecnologia	Emissioni evitate
	gCO _{2eq} /m ² anno
Bianco riflettente	1300

EFFICACIA TECNICO-ECONOMICA

Dalle tabelle di cui sopra non è possibile effettuare un confronto fra fonti energetiche rinnovabili e la tecnologia del bianco riflettente in termini di CO₂ evitata poiché le prime costituiscono sistemi per la produzione di energia, la seconda un sistema per mitigare la crescita della temperatura media terrestre. Visto che il principale obiettivo delle fonti energetiche rinnovabili è comunque quello della riduzione dell'emissione in atmosfera dei gas climalteranti si propone un confronto di queste ultime con il bianco riflettente mediante la valutazione del costo economico necessario per evitare l'immissione in atmosfera di un corrispondente quantitativo di CO_{2eq}.

Per quanto riguarda gli impianti fotovoltaici, eolici, solari termici ed idroelettrici, il costo di riduzione delle emissioni di gas serra in atmosfera è stato valutato come rapporto tra la differenza di prezzo di produzione rispetto alla migliore tecnologia funzionante con fonti tradizionali e le corrispondenti emissioni evitate per la generazione dell'unità energetica elettrica o termica:

$$C_{CO_2} = \frac{CP_{FR} - CP_{FF}}{E_{FF} - E_{FR}} \quad (1)$$

Nel caso delle superfici bianche è stato invece preso a riferimento il prezzo della pittura, maggiorato del 20 % per tener conto del prezzo della manodopera necessaria a realizzare ed a mantenere efficiente la superficie stessa.

Impianto fotovoltaico

Il costo di produzione dell'energia elettrica mediante pannelli fotovoltaici varia in funzione della taglia dell'impianto. Per impianti di potenzialità fino a 20 kW il costo medio di produzione risulta pari a 0,39 €/kWh_e, per impianti di potenzialità maggiore tale costo si riduce a circa 0,35 €/kWh_e [9-11]. Il costo medio di produzione di energia elettrica con un impianto fotovoltaico è dunque pari a 0,37 €/kWh_e. Considerando che il costo medio di produzione di un impianto a ciclo combinato è di circa 0,047 €/kWh_e, la differenza di costo tra le due tecnologie risulta pari a 0,323 €/kWh_e. Mediante la relazione (1) si ottiene che il costo medio di abbattimento della CO_{2eq} è dunque pari a 74,8 c€/kgCO_{2eq}.

Per i pannelli fotovoltaici policristallini e monocristallino il costo di abbattimento della CO_{2eq} in atmosfera risulta rispettivamente uguale a 83,0 c€/kgCO_{2eq} e 98,8 c€/kgCO_{2eq}.

Solare termico (Collettore piano)

Il costo di produzione dell'energia termica mediante pannelli solari varia in funzione della taglia dell'impianto. Per impianti di potenzialità domestici il costo medio di produzione risulta pari a 0,070 €/kWh_t [9-11]. Il costo medio di produzione di energia termica con una caldaia domestica a metano è pari a 0,044 €/kWh_t. Pertanto la differenza di costo tra le due tecnologie risulta 0,026 €/kWh_t. Mediante la relazione (1) il costo medio di abbattimento della CO_{2eq} risulta quindi uguale a 14,5 c€/kgCO_{2eq}.

Impianto eolico

Il costo di produzione dell'energia elettrica mediante impianto eolico varia in funzione della taglia dell'impianto (numero di elio generatori che lo costituiscono) e del tipo di tensione (alta bassa) della rete cui l'impianto è collegato. Il costo medio di produzione del kWh elettrico è di circa 0,066 €/kWh_e [9-11]. Rispetto ad un impianto a ciclo combinato (0,047 €/kWh_e) la differenza di costo risulta pari a 0,019 €/kWh_e.

Il costo medio di abbattimento della CO_{2eq} è quindi pari a 3,9 c€/kgCO_{2eq}.

Impianto idroelettrico

Il costo di produzione dell'energia elettrica mediante impianto idroelettrico varia in funzione della taglia dell'impianto e del tipo di salto. Il costo medio risulta pari a 0,068 €/kWh_e [9-11]. Rispetto ad un impianto a ciclo combinato (0,047 €/kWh_e) la differenza di costo è di circa 0,021 €/kWh_e.

Il costo medio di abbattimento della CO_{2eq} è quindi pari a 4,3 c€/kgCO_{2eq}.

Superficie bianco riflettente

Il prezzo della pittura per segnaletica stradale orizzontale è di circa 3,24 €/m² mentre il prezzo della pittura tipo Fotosil è di 2,3 €/m² [12]. Il costo di "abbattimento" delle emissioni di CO_{2eq} risulta quindi di 6,2 c€/kgCO_{2eq} per la superficie realizzata con pittura in resina all'acqua e di 4,4 c€/kgCO_{2eq} per la superficie realizzata con pittura tipo Fotosil.

Tabella 3: Confronto fra i costi di mancata emissione della CO_{2eq} con le diverse fonti energetiche rinnovabili e con la tecnologia bianco riflettente.

Tecnologia	Costo della CO _{2eq} evitata
	c€/kgCO _{2eq}
Fotovoltaico silicio amorfo	74,8
Fotovoltaico policristallino	83,0
Fotovoltaico monocristallino	98,8
Solare termico (collettore piano)	14,5
Eolico	3,9
Idroelettrico	4,3
Bianco riflettente con pittura in resina all'acqua	6,2
Bianco Riflettente con pittura di tipo Fotosil	4,4

CONCLUSIONI

Nel presente studio sono stati quantificati e confrontati i costi di evitate emissioni di CO_{2eq} in atmosfera conseguenti all'impiego delle principali fonti energetiche rinnovabili.

Per ciascuna tecnologia tali costi sono stati calcolati come differenza tra il costo del kWh prodotto con fonte rinnovabile e con impianto combinato, normalizzata rispetto alle mancate emissioni.

Dallo studio emerge che i costi di riduzione delle emissioni derivanti dall'impiego di fonti energetiche rinnovabili sono diversi a secondo della tecnologia considerata. Il fotovoltaico, ad esempio, con valori compresi tra 74,5 c€/KgCO_{2eq} e 98,8 c€/KgCO_{2eq} risulta la tecnologia economicamente meno conveniente. La causa è da ricercarsi nell'elevato consumo di energia primaria connesso alle fasi di produzione dei pannelli fotovoltaici ed in particolar modo di quelli in silicio monocristallino.

Minore è il costo delle emissioni evitate in atmosfera ottenute mediante pannelli solari termici per i quali si ha un valore di circa 14,5 c€ per ogni Kg di CO_{2eq} evitata.

Le tecnologie rinnovabili più efficaci in termini di convenienza economica sono quella eolica e quella idroelettrica con costi rispettivamente di 3,9 c€/KgCO_{2eq} e 4,3 c€/KgCO_{2eq}. In questo contesto, molto interessante risulta l'impiego di superfici riflettenti per compensare l'immissione in atmosfera di gas serra. Con un prezzo variabile tra 6,2 c€/KgCO_{2eq} e 4,4 c€/KgCO_{2eq} tale tecnologia presenta infatti costi di riduzione allineati con le fonti rinnovabili più convenienti con in più il vantaggio di una elevata semplicità tecnologica e di rapidità di installazione.

Quest'ultime caratteristiche rendono la tecnologia particolarmente adatta ai paesi non ancora tecnicamente maturi come quelli del "Sud del Mondo" dove per altro i valori del soleggiamento sono più elevati e tali sistemi maggiormente efficaci e convenienti in termini di CO₂ evitata. Si pensa infatti che una equivalente superficie posta in una zona del deserto Sahariano possa avere una efficacia 3-4 volte maggiore e possa altresì costituire una interessante opportunità economica per i numerosi paesi poveri o in via di sviluppo presenti in tali aree.

ELENCO SIMBOLI

C_{CO2}= Costo di abbattimento della CO_{2eq} [c€/KgCO_{2eq}];

CP_{FR}= Costo di produzione dell'unità energetica con fonti rinnovabili [c€/kWh];

CP_{FF}= Costo di produzione dell'unità energetica con fonti tradizionali [c€/kWh];

E_{FR}= Emissioni di CO_{2eq} con fonti energetiche rinnovabili [KgCO_{2eq}/kWh];

E_{FF}= Emissioni di CO_{2eq} con fonti energetiche tradizionali [KgCO_{2eq}/kWh];

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. Franco Cotana, Federico Rossi, "Sistemi e dispositivi per il controllo dell'albedo terrestre finalizzati al contenimento del riscaldamento globale in base alla relazione quantitativa di cui al brevetto n. PG 2006 A 0086", Brevetto n. PG 2007 A 0009, Depositato presso l'Ufficio Provinciale Industria Commercio ed Artigianato di Perugia;
2. Alseno E.A., De Wild-Sholten M. J., Ftenakis V.M., 2006. Environmental impacts of PV electricity generation-a critical comparison of energy supply options, In: Proceeding of 21st European photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006;
3. Raugei M., Bargigli S., Ulgiati S., 2007. Life cycle assessment and Energy pay-back time of advanced photovoltaic modules: CdT and CIS compared to Poly-SI. Energy 32 (2007), pp 1310-1318.
4. Battisti R., Corrado A., 2005. Evaluation of technical improvement of photovoltaic system through life cycle assessment methodology. Energy 30 (2005).pp 952-967;
5. Hagegedorn G., 1989. Hidden energy in solar cells and photovoltaic power station. In: proceeding of 9th PV specialist conference, Germany. pp 542-546;
6. GEMIS, 2002. Global emission model for integrated system, GEMIN 4,1 Database (September 2002). Oko Institut Darmstadt. Germany;
7. Karl E.K., Theresa L.I., 2002. Initial empirical results for the energy payback time of photovoltaic modules. Siemens Solar Industries. Carnarillo;
8. APER Associazione Produttori Energia da Fonti Rinnovabili, 2007. www.aper.it;
9. ENEL, 2004. Certified Environmental Product Declaration (EPD) of electricity produced in the ENEL wind farm of Scafani Bagni (Parerno, Italy);
10. CESI, 2004. www.cesi.it;
11. IEA (International Energy Agency, 2005. www.iea.org;
12. Global Engineering, 2008. www.ecorivestimento.it.