

## **IMPIANTO FOTOVOLTAICO PER LA STAZIONE DI PIAN DI MASSIANO DEL MINIMETRÒ DI PERUGIA**

Franco Cotana, Michele Goretti

Università degli Studi di Perugia – Dipartimento di Ingegneria Industriale  
Via G. Duranti, 67 – 06125 PERUGIA

### **SOMMARIO**

Il presente lavoro riguarda lo studio di un impianto fotovoltaico da integrare sulle coperture di una stazione terminale del “Minimettrò”, l’innovativo sistema di trasporto a fune in costruzione a Perugia.

La stazione è quella di Pian di Massiano, che si trova in un’ampia area pianeggiante alla periferia della città: tale scelta coniuga il vantaggio della maggiore superficie di copertura disponibile a condizioni ottimali di esposizione all’irraggiamento solare.

Nel lavoro sono confrontate due differenti alternative progettuali finalizzate a contenere l’impatto visivo dell’impianto e sono analizzati aspetti tecnici, costi e benefici dell’opera, anche in relazione alle utenze elettriche costituite da impianti di stazione, uffici, attività commerciali e servizi previsti.

Sono infine considerati i possibili benefici ambientali ed economici, rispettivamente in termini di emissioni di CO<sub>2</sub> evitate e di tariffe incentivanti, ai sensi del Decreto Ministeriale 28 luglio 2005 e delle successive modifiche ed integrazioni, che introducono in Italia il sistema del “conto energia” per il settore fotovoltaico.

### **INTRODUZIONE**

L’esaurimento delle risorse fossili tradizionali e l’aumento del prezzo del petrolio, unitamente all’emergenza dell’effetto-serra, alla crescita della domanda di energia e al rischio di black-out, hanno riportato alla ribalta la questione energetica. Direttive comunitarie e convenzioni internazionali spingono inoltre verso una nuova concezione della progettazione, basata su eco-sostenibilità e risparmio di energia.

In tale contesto, lo strumento del “conto energia” ha dato impulso alla progettazione di impianti fotovoltaici, con incentivi che hanno permesso il decollo del settore in Italia.

In sintesi, il “conto energia” prevede la possibilità di vendere per 20 anni al gestore elettrico nazionale l’energia prodotta mediante tecnologia fotovoltaica, ad un prezzo molto vantaggioso (circa due volte e mezzo il prezzo a cui viene poi rivenduta per scopi privati dal gestore).

Nel presente lavoro è illustrato lo studio preliminare di fattibilità tecnico-economica di un impianto fotovoltaico, da installare sulle coperture del *terminal* Pian di Massiano del “Minimettrò” di Perugia. Gli edifici della stazione terminale di tale originale sistema di trasporto a fune sorgono al centro di un’ampia area pianeggiante alla periferia della città e coniugano il vantaggio della estesa copertura piana disponibile a condizioni ottimali di esposizione all’irraggiamento solare.

Nello studio sono confrontate due ipotesi progettuali, caratterizzate da differenti tipologie di moduli fotovoltaici, in configurazioni tali da ottimizzare la produzione elettrica e limitare l’impatto visivo dell’opera.

### **CONTO ENERGIA PER IL SOLARE FOTOVOLTAICO**

Il DM 28 luglio 2005 [1] ha introdotto in Italia il

meccanismo che prevede l’incentivazione del kWh fotovoltaico, in attuazione dell’art. 7 del DLgs n. 387/2003, che recepisce la Direttiva europea 2001/77/CE in materia di fonti rinnovabili. Il Decreto definisce il cosiddetto “conto energia” per impianti fotovoltaici di potenza tra 1 e 1.000 kW.

Con Delibera n. 188/05 [2], in attuazione dell’articolo 9 del DM 28 luglio 2005, l’Autorità per l’Energia Elettrica e il Gas (AEEG) ha individuato nel Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (GRTN) il “soggetto attuatore” ed ha previsto le modalità e le condizioni di erogazione delle tariffe incentivanti, nonché le modalità di presentazione delle domande e le necessarie verifiche.

Ulteriori modifiche e precisazioni al DM 28 luglio 2005 sono state introdotte con il successivo DM 6 febbraio 2006 [3]. Inoltre la Delibera AEEG n. 40/06 [4] modifica ed integra la precedente Delibera n. 188/05.

Il 19 settembre 2005 è iniziata l’esperienza del “conto energia” per il settore fotovoltaico, con la possibilità di presentare la domanda per beneficiare della tariffa incentivante. L’incentivo per la produzione elettrica da tecnologia fotovoltaica sarà erogato su tutta la produzione dell’impianto per 20 anni e ne potranno beneficiare persone fisiche e giuridiche, compresi soggetti pubblici e condomini.

Le tariffe per kWh sono definite in base alla taglia dell’impianto (*Tab. 1*). Il DM 6 febbraio 2006 precisa che la tariffa iniziale comunicata dal GRTN nella lettera di accettazione rimane costante per 20 anni. Per le domande di impianti presentate dal 2007, invece, le tariffe saranno aggiornate con un incremento secondo l’indice ISTAT, ma subiranno una decurtazione del 5% l’anno. Il nuovo Decreto introduce un incremento della tariffa incentivante del 10% per l’integrazione del fotovoltaico in edifici di nuova costruzione oppure oggetto di ristrutturazione straordinaria (tariffe costanti fino al 2012 incluso).

La domanda di accesso alla tariffa incentivante dovrà essere presentata al GRTN nell'ultimo mese di ciascuno trimestre: 1°-31 marzo, 1°-30 giugno, 1°-30 settembre, 1°-31 dicembre.

Tab. 1. Tariffe incentivanti in “conto energia” fotovoltaico valide per 20 anni (domande 2005-2006)

Potenza impianto	Tariffa incentivante
da 1 a 20 kW	0,445 €/kWh <sup>(a)</sup> 0,460 €/kWh
da 20 a 50 kW	0,460 €/kWh
da 50 a 1.000 kW	0,490 €/kWh <sup>(b)</sup>

<sup>(a)</sup> Scambio sul posto

<sup>(b)</sup> Valore massimo della tariffa soggetto a gara

Nel “conto energia” italiano l'energia elettrica prodotta da un impianto fotovoltaico può beneficiare delle incentivazioni sia se autoconsumata sia se immessa nella rete locale, quando la produzione eccede il consumo dell'utenza.

Nel caso di impianti fino a 20 kW di potenza, l'incentivo ventennale proveniente dalla produzione è pari a 0,445 €/kWh. Un ulteriore beneficio è il risparmio sui normali consumi. Infatti, l'elettricità da fonte solare fotovoltaica impiegata dall'utenza e/o ceduta alla rete elettrica locale sarà scontata dalle bollette: l'ulteriore vantaggio economico dipenderà dalla tariffa del contratto di fornitura dell'elettricità, mediamente compresa tra 0,16 e 0,18 €/kWh.

Il DM 6 febbraio 2006 stabilisce che per gli impianti con potenza non superiore a 20 kW è possibile optare per il servizio di scambio sul posto o per la cessione in rete dell'energia prodotta. Nel primo caso la tariffa incentivante è pagata solo per l'energia prodotta e consumata in loco, mentre la produzione in eccesso rispetto ai consumi non viene retribuita. Nel secondo caso, qualora si decida di rinunciare allo scambio sul posto, è incentivata tutta la produzione fotovoltaica, anche se superiore ai consumi, alla tariffa di 0,46 €/kWh, mentre per la cessione alla rete dell'energia elettrica prodotta viene pagata una tariffa di 0,095 €/kWh.

Per gli impianti tra 20 e 50 kW di potenza, oltre all'incentivo ventennale proveniente dalla produzione (0,46 €/kWh), si potranno aggiungere i benefici derivanti dal:

- risparmio, per l'utenza collegata al sistema, consentito dall'impiego dell'energia prodotta e autoconsumata;
- ricavato derivante dalla vendita delle eccedenze alla rete locale; la Delibera AEEG n. 34 del 2005, stabilisce che il prezzo dell'energia ceduta alla rete sia di 0,095 €/kWh (fino a 500.000 kWh/anno ceduti alla rete).

Nel caso di impianti tra 50 e 1.000 kW di potenza, l'incentivo ventennale proveniente dalla produzione è moltiplicato per una tariffa incentivante che dovrà essere proposta dal richiedente e il cui valore massimo è stabilito in 0,49 €/kWh; questa tariffa è sottoposta ad un meccanismo di gara. Anche per queste taglie si potranno aggiungere i benefici del risparmio da autoconsumo e dei ricavi dalla vendita delle eccedenze (0,095 €/kWh fino a 500.000 kWh/anno ceduti alla rete; 0,080 €/kWh da 500.000 a 1 milione di kWh/anno; 0,070 €/kWh da 1 a 2 milioni di kWh/anno).

Mentre per le prime due tipologie (taglie 1-20 e 20-50 kW<sub>p</sub>) l'elenco degli impianti aventi diritto alla tariffa incentivante è ordinato secondo la data di presentazione della domanda al GRTN, nel caso degli impianti sopra i 50 kW<sub>p</sub> la graduatoria è definita in base alla tariffa incentivante richiesta: la priorità sarà data alle domande con il valore più basso della tariffa.

Inoltre, per gli impianti con taglia da 50 a 1.000 kW, il soggetto responsabile dell'impianto ha l'obbligo di presentare

una dichiarazione con l'impegno a costituire e far pervenire al GRTN una cauzione entro 30 giorni dalla comunicazione dell'accettazione della tariffa incentivante. La cauzione, dell'importo di 1.000 € per kW<sub>p</sub> da installare, è considerata quale penale in caso di mancata realizzazione dell'impianto nei termini previsti e non è richiesta agli enti locali.

Il Decreto prevede anche specifiche condizioni per la cumulabilità del “conto energia” con altri incentivi (art. 10).

Il GRTN dovrà valutare l'ammissibilità tecnica delle richieste pervenute e potrà effettuare le verifiche durante la realizzazione e l'esercizio dell'impianto fotovoltaico.

Con il DM 6 febbraio 2006 le tariffe incentivanti saranno riconosciute fino a quando la potenza cumulativa di tutti gli impianti che le ottengono raggiungerà la quota di 500 MW (il precedente limite era di 100 MW): 360 MW per gli impianti fino a 50 kW<sub>p</sub> e 140 MW per gli impianti da 50 a 1.000 MW<sub>p</sub>.

Il nuovo Decreto stabilisce un limite totale annuo che dal 2006 al 2012 sarà di 85 MW: 60 MW per impianti con potenza inferiore a 50 kW e 25 MW per potenze superiori a 50 kW. L'obiettivo nazionale di potenza cumulata da installare al 2015 sale a 1.000 MW (era di 300 MW nel precedente Decreto).

## UBICAZIONE DELL'IMPIANTO

### Sistema di trasporto a fune “Minimetron”

L'originale sistema di trasporto “Minimetron” è un progetto innovativo di “mobilità sostenibile”, che prevede vetture prive di motore proprio, dotate di ruote gommate, in movimento su rotaie di acciaio. Il moto sarà trasmesso da una fune di acciaio ad anello, azionata da un motore elettrico, alla quale le vetture saranno vincolate mediante morse elettromeccaniche.

Nelle stazioni, le vetture si sganceranno dalla fune e si muoveranno in modo indipendente, grazie ad un sistema di ruote gommate ad asse verticale. Il sistema sarà completamente automatizzato e consentirà di prolungare il tempo di sosta in modo da garantire un imbarco sicuro anche a chi necessita di particolare tutela (bambini, anziani e disabili).

La lunghezza totale del percorso è di circa 3.016 m. L'opera, attualmente in fase di realizzazione, collegherà la periferia al centro storico di Perugia, da Pian di Massiano a Pincetto-Centro, con l'obiettivo di ridurre il traffico veicolare (pubblico e privato), le emissioni inquinanti (acustiche ed atmosferiche) ed i consumi energetici. Alla velocità nominale di esercizio di 7 m/s e alla portata oraria di dimensionamento di 3.000 pphpd (persone per ora per direzione), la potenza richiesta dal sistema “Minimetron” sarà di circa 3.000 kW.

### Terminal Pian di Massiano del sistema “Minimetron”

La stazione terminale di Pian di Massiano rappresenta la porta di ingresso al “Minimetron” e si appresta a diventare la nuova porta di accesso alla città di Perugia, intercettando le auto alla periferia ed integrandosi nel progetto “Porta Nova”.

A Pian di Massiano il sistema di trasporto a fune “Minimetron” si attesta strategicamente presso il più grande parcheggio di scambio di Perugia. Qui avverrà la connessione tra “Minimetron”, servizi di trasporto pubblico, autobus turistici ed auto private: cittadini, studenti e turisti potranno raggiungere il centro storico rapidamente, senza dover attraversare la città a bordo di mezzi di trasporto inquinanti.

Il terminal è situato nelle vicinanze dei principali impianti sportivi (tra i quali stadio e palasport) e di spazi destinati ad ospitare mercati, fiere, luna park, manifestazioni e spettacoli.

La stazione “Minimetrò” di Pian di Massiano occupa un’area di circa 3.680 m<sup>2</sup>. La superficie coperta è di circa 2.750 m<sup>2</sup>, distribuita in 7 unità che ospiteranno, oltre al *terminal*, locali adibiti ad uffici direzionali, attività commerciali e servizi. Nel piano interrato, invece, avranno sede l’officina di manutenzione ed il magazzino veicoli.

La struttura architettonica dell’intero complesso, comprendente stazione e centro direzionale-commerciale, è realizzata su pianta quadrata, con percorsi all’aperto che da ciascuno dei quattro lati convergono in una piazza interna, parzialmente coperta da una pensilina leggera.

### Scelta dell’ubicazione dell’impianto

Nel presente lavoro sono illustrate due alternative per il progetto preliminare di un impianto fotovoltaico, da realizzare sulle coperture degli edifici che ospitano il *terminal* Pian di Massiano del “Minimetrò” di Perugia. Gli edifici si trovano in località Pian di Massiano, nel comune di Perugia, ad una latitudine di circa 43° 6’ Nord, ad una longitudine di circa 12° 23’ Est e a circa 300 m di altitudine sul livello del mare.

La scelta è ricaduta sul complesso della stazione e del centro direzionale-commerciale di Pian di Massiano, sia per la tipologia costruttiva delle coperture, sia per le condizioni di esposizione alla radiazione solare: su tale stazione è minimo l’ombreggiamento (assenza di ombre portate dell’ambiente circostante) e pertanto le perdite correlate sono nulle.

Inoltre la superficie a disposizione è sufficientemente ampia e permette l’installazione dei moduli fotovoltaici nella direzione azimutale ottimale ai fini della captazione della radiazione solare incidente. Infine sarà possibile generare energia da fonte rinnovabile non inquinante per soddisfare parte delle utenze elettriche del *terminal*.

## ANALISI DEL PROGETTO

### Descrizione generale

Sono state confrontate due ipotesi progettuali, elaborate impiegando due tipologie di moduli fotovoltaici, differenti per dimensioni e caratteristiche tecniche, collegati in serie e raggruppati in stringhe. Le singole stringhe di moduli saranno collegate tra loro in parallelo. Nell’alternativa *A* il campo fotovoltaico sarà costituito da moduli in silicio monocristallino da 55 W<sub>p</sub> ciascuno, che hanno un’altezza di soli 34 cm. Anche l’alternativa *B* prevede l’installazione di moduli in silicio monocristallino, ma in tal caso ogni pannello avrà potenza nominale di 110 W<sub>p</sub> e altezza di 65,4 cm.

L’impianto sarà costituito da un campo fotovoltaico della potenza complessiva rispettivamente di 95,5 kW<sub>p</sub> (alternativa *A*) e di 129,3 kW<sub>p</sub> (alternativa *B*), somma delle potenze nominali dei singoli moduli, come misurata in stabilimento in STC (*Standard Test Condition*: irraggiamento 1.000 W/m<sup>2</sup>, temperatura della cella 25°C e massa d’aria AM 1,5).

L’impianto sarà connesso a gruppi di conversione DC/AC (*inverter*), i quali saranno collegati alla rete mediante un opportuno quadro di consegna e ad un sistema di misura dell’energia elettrica prodotta. Il campo fotovoltaico sarà collegato in parallelo con la rete elettrica, funzionante a 380 V.

L’impianto sarà progettato e realizzato in accordo con gli standard CEI-IEC, UNI-ISO e Marchio CE e con le disposizioni legislative vigenti, quali il D.Lgs. n. 626/94 e la Legge n. 46/90. Le caratteristiche tecniche dell’impianto e dei

suoi principali componenti, nelle due soluzioni progettuali *A* e *B*, sono sintetizzate in Tab. 2.

Tab. 2. Scheda tecnica dell’impianto (alternative A e B)

Alternativa	A	B
<b>Caratteristiche dei moduli fotovoltaici:</b>		
Silicio	Monocristallino	Monocristallino
Celle	36	72
Corrente di corto circuito	3,38 A	6,76 A
Tensione a vuoto	21,60 V	21,60 V
Corrente a potenza di picco	3,16 A	6,32 A
Tensione a potenza di picco	17,40 V	17,40 V
Potenza di picco	55 W <sub>p</sub>	110 W <sub>p</sub>
Lunghezza	130,4 cm	131 cm
Larghezza (altezza)	34 cm	65,4 cm
Spessore	3,95 cm	3,95 cm
Superficie	0,443 m <sup>2</sup>	0,857 m <sup>2</sup>
Peso	5,5 kg	11,5 kg
<b>Caratteristiche dell’impianto:</b>		
Moduli	1.736	1.175
Superficie moduli	769,7 m <sup>2</sup>	1.006,7 m <sup>2</sup>
Efficienza moduli	12,5%	13%
Efficienza altri componenti	80%	80%
Efficienza totale impianto	10%	10,4%
Potenza di picco totale	95,5 kW <sub>p</sub>	129,3 kW <sub>p</sub>
Produzione elettrica totale	125.436 kWh/an.	170.622 kWh/an.
Tempo irraggiamento totale	1.314 h/anno	1.320 h/anno
Emiss. CO <sub>2</sub> evitate (1 anno)	68.990 kg/anno	93.842 kg/anno
Emiss. CO <sub>2</sub> evitate (30 anni)	2.069.691 kg	2.815.267 kg

I moduli saranno fissati su un’idonea struttura metallica di sostegno, vincolata alle coperture degli edifici. A tale proposito si è provveduto a valutare il contributo del campo fotovoltaico nell’analisi dei carichi agenti sulle coperture, al fine di verificare la possibilità di realizzare l’impianto su tali strutture: i carichi aggiuntivi dovuti al campo fotovoltaico sono modesti (fino a circa 50 kg/m<sup>2</sup>), specialmente l’azione del vento, data la limitata superficie e la particolare disposizione dei moduli adottati.

### ORIENTAMENTO DEI MODULI

I moduli fotovoltaici sono installati parallelamente alla direzione Sud. Per l’emisfero settentrionale, infatti, tale orientamento (azimut = 0) è adottato al fine di rendere massima la captazione dell’energia solare incidente durante l’intero anno. In virtù di tale scelta, le stringhe fotovoltaiche non sono disposte parallelamente ai bordi delle costruzioni.

Sempre per ragioni di ottimizzazione energetica, la Letteratura tecnica e gli operatori del settore consigliano di adottare angoli di inclinazione  $\beta$  dei moduli compresi in un intervallo pari a  $\varphi \pm 10^\circ$ , dove  $\varphi$  è la latitudine della località nella quale è installato l’impianto.

Si è quindi valutata la radiazione solare incidente sulla superficie dei moduli per varie ipotesi di angolo di inclinazione (10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 35°, 40°, 45°, 50° e 55°). I dati meteorologici e radiometrici a cui si è fatto riferimento sono quelli riportati nella norma UNI 10349, relativi a Perugia, impiegando inoltre i metodi di calcolo della UNI 8477. I risultati ottenuti hanno dimostrato che l’angolo di inclinazione che massimizza nel corso dell’anno la radiazione solare incidente sul piano dei moduli è pari a 30°.

L’irraggiamento medio mensile per le alternative esaminate (circa 770 e 1.007 m<sup>2</sup> di pannelli) è riportato in Tab. 3.

Tab. 3. Valori medi mensili dell'irraggiamento (località: Perugia; inclinazione: 30°)

Mese	Irraggiamento		
	Superficie unitaria (kWh/m <sup>2</sup> )	Ipotesi A (kWh)	Ipotesi B (kWh)
Gennaio	74	56.595	74.022
Febbraio	83	64.015	83.726
Marzo	128	98.473	128.794
Aprile	147	113.125	147.958
Maggio	179	138.069	180.583
Giugno	184	141.330	184.848
Luglio	209	160.926	210.478
Agosto	191	147.300	192.656
Settembre	156	120.416	157.494
Ottobre	135	103.538	135.420
Novembre	80	61.341	80.229
Dicembre	64	49.231	64.390
<b>Totale</b>	<b>1.630</b>	<b>1.254.358</b>	<b>1.640.598</b>

La disposizione delle stringhe è stata scelta considerando che, alla latitudine di circa 43° e con un'inclinazione dei moduli di 30°, la distanza minima tra file contigue al fine di evitare l'ombreggiamento reciproco è pari a due volte la lunghezza del lato inclinato dei pannelli. Nell'alternativa progettuale *A* l'interasse tra le stringhe è stato incrementato fino a 89,5 cm, realizzando corridoi di circa 60 cm di larghezza, tali da permettere il passaggio di tecnici specializzati per svolgere attività di installazione, manutenzione e riparazione. Per l'alternativa *B* (Fig. 1) l'interasse previsto è pari a 130,8 cm e consente di ottenere corridoi di circa 74 cm di larghezza. Inoltre sono stati garantiti gli spazi di transito necessari tra il bordo delle coperture ed il campo fotovoltaico (circa 1 m).

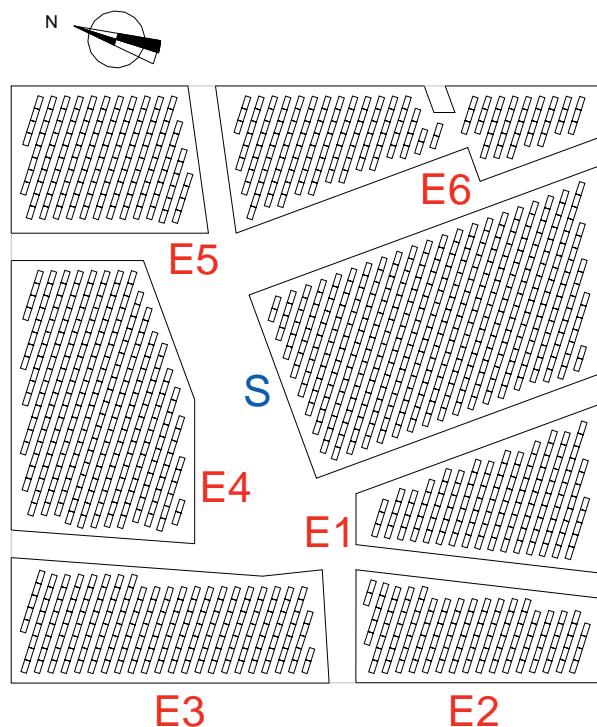


Fig. 1. Disposizione dei moduli fotovoltaici sulle coperture del terminal Pian di Massiano del "Minimetrò"

## PRINCIPALI COMPONENTI DELL'IMPIANTO

### Moduli fotovoltaici in silicio monocristallino

I moduli fotovoltaici impiegati per il progetto (Tab. 2) sono realizzati in silicio monocristallino, a struttura rigida. Ogni pannello è costituito da celle fotovoltaiche ad alto rendimento di forma quadrata (10,3 cm di lato) di color antracite, in numero di 36 (alternativa *A*) o 72 (alternativa *B*).

I moduli sono dotati di cornice in alluminio anodizzato, con fori predisposti per il fissaggio sulle strutture metalliche di sostegno e il collegamento del cavo a terra.

I pannelli dispongono di strati protettivi posteriori in Tedlar, vetro protettivo sul lato superiore ed EVA (etilenevinil-acetato). Le scatole di collegamento sul lato posteriore sono sigillate ai bordi per evitare infiltrazioni d'acqua ed all'interno possiedono diodi di protezione.

I moduli fotovoltaici scelti hanno ottenuto le certificazioni IEC, EN, Classe II, ISO 9001, ISO 14001, CE e TÜV.

### Struttura di sostegno dei moduli fotovoltaici

Le stringhe di moduli fotovoltaici poste in copertura dovranno essere sostenute da strutture idonee a garantirne la perfetta staticità, sotto l'azione dei carichi permanenti agenti (pesi propri dei componenti) e di quelli accidentali (azione di vento e neve).

Le strutture di sostegno saranno realizzate in profilati di alluminio o di acciaio inox, disposti a formare tralicci triangolari ad interasse di circa 1,30 m, con funzione di appoggi inclinati di 30° sull'orizzontale. Le opere di sostegno garantiranno portanza per i moduli fotovoltaici e insisteranno sulle coperture (solai in lamiera grecata coperti da grigliati): il collegamento tra le strutture metalliche e i solai sarà realizzato mediante piastre di ancoraggio con tirafondi metallici.

### Inverter

Il convertitore statico DC/AC è un invertitore a commutazione forzata che eroga la potenza elettrica generata dal campo fotovoltaico.

Una volta individuata la configurazione che risulta più conveniente, costituita da impianti separati sui singoli edifici o da un solo impianto per l'intero terminal, potranno essere adottati inverter monofase, di dimensioni compatte e peso contenuto, collegati opportunamente per ottenere corrente trifase, oppure si potrà installare un unico inverter trifase di elevata potenza nominale.

Infine sarà realizzata una connessione in parallelo con la rete (sistema *grid connected*). Il quadro in bassa tensione (BT) sarà collegato alla rete elettrica per la consegna dell'energia prodotta e sarà equipaggiato con opportuni contatori, per la contabilizzazione dell'energia ceduta e prelevata dalla rete.

### PRESTAZIONI DELL'IMPIANTO

È stata calcolata l'energia elettrica che l'impianto fotovoltaico è in grado di produrre nella configurazione ipotizzata, con inclinazione fissa ed ottimizzata dei moduli (esposizione a Sud, angolo di 30°), secondo le UNI 10349 e UNI 8477, tenendo conto dell'assenza di ombre portate.

L'efficienza operativa media annuale è stata calcolata come prodotto dell'efficienza media dei moduli (circa il 12,5% nell'ipotesi *A* e circa il 13% nella *B*) per l'efficienza media del

sistema (circa l'80%) e risulta rispettivamente pari a circa il 10% e a circa il 10,4% (Tab. 2).

L'energia elettrica producibile dall'impianto fotovoltaico è data dal prodotto dell'irraggiamento totale per tale efficienza operativa media annuale. È stato così stimato che l'energia totale annua erogabile è di circa 125.436 kWh per l'alternativa A e circa 170.622 kWh per l'alternativa B, mediamente con circa 1.314 e 1.320 h/anno di irraggiamento (Tab. 2); infine sono state ottenute le produzioni mensili indicate in Tab. 4.

Tab. 4. Produzione media mensile stimata di energia elettrica (località: Perugia; inclinazione: 30°)

Mese	Energia	
	A (kWh)	B (kWh)
Gennaio	5.660	7.698
Febbraio	6.402	8.708
Marzo	9.847	13.395
Aprile	11.312	15.388
Maggio	13.807	18.781
Giugno	14.133	19.224
Luglio	16.093	21.890
Agosto	14.730	20.036
Settembre	12.042	16.379
Ottobre	10.354	14.084
Novembre	6.134	8.344
Dicembre	4.923	6.697
<b>Totale</b>	<b>125.436</b>	<b>170.622</b>

A regime il prelievo di energia da parte dell'intero sistema "Minimetrò" sarà di circa 3.000 kW [5]. Nella stazione terminale di Pian di Massiano gli impianti di potenza e di automazione, appartenenti al sistema elettromeccanico di trasporto, richiedono una potenza installata di circa 292 kW; per le infrastrutture a servizio del "Minimetrò" (utenze elettriche di stazione) la potenza impegnata è valutata pari a circa 70 kW. I consumi dovuti al sistema di trasporto incidono sul carico elettrico di punta, ovvero sulla potenza installata, mentre i consumi delle infrastrutture determinano il fabbisogno elettrico di base. Infine, per le 11 attività direzionali-commerciali ospitate presso il *terminal* è ragionevole prevedere una richiesta di ulteriori 70 kW complessivi di potenza.

L'analisi dei consumi elettrici, effettuata considerando un esercizio di 5.475 h/anno [6], evidenzia come presso la stazione di Pian di Massiano siano necessari circa 1.598.700 kWh/anno per il funzionamento del sistema elettromeccanico, circa 383.250 kWh/anno per le infrastrutture di stazione ed altri 383.250 kWh/anno per le utenze di uffici e attività commerciali. L'impianto fotovoltaico, quindi, sarà in grado di coprire circa il 32,7% (ipotesi A) o il 44,5% (ipotesi B) del fabbisogno elettrico del centro direzionale-commerciale o in alternativa degli impianti elettrici del *terminal*, oppure circa il 7,8% (A) o il 10,7% (B) dell'energia necessaria nelle normali condizioni di funzionamento degli impianti di potenza e di automazione di Pian di Massiano.

Infine la Tab. 5 mostra i principali parametri tecnici degli impianti fotovoltaici ubicati sui singoli edifici del *terminal* (Fig. 1), considerati separatamente.

Tab. 5. Parametri tecnici dell'impianto suddivisi per edificio

Edificio	Alternativa A		Alternativa B	
	P. di picco (kW <sub>p</sub> )	Energia (kWh)	P. di picco (kW <sub>p</sub> )	Energia (kWh)
S (stazione)	26,3	34.610	35,8	47.193
E1	9,1	11.922	12,2	16.118
E2	8,0	10.477	11,0	14.521
E3	12,9	16.980	17,5	23.088
E4	18,3	23.989	24,8	32.672
E5	9,8	12.862	13,2	17.425
E6	11,1	14.596	14,9	19.603
<b>Totale</b>	<b>95,5</b>	<b>125.436</b>	<b>129,3</b>	<b>170.622</b>

## ANALISI ECONOMICA

Il metodo impiegato in questa sede per l'analisi economica dell'impianto è il *Payback period*, che consiste nel valutare il tempo necessario a recuperare il capitale investito attraverso i flussi di cassa netti.

Per quanto concerne la valutazione dell'investimento iniziale, il costo dell'opera è stato stimato in Tab. 6, valutando i contributi dei principali componenti dell'impianto (moduli fotovoltaici, inverter, strutture di supporto e di ancoraggio, comprensivi di manodopera e cablaggi) e delle attività di progettazione, direzione lavori e collaudo. Nella stessa tabella sono riportati i benefici annui: questi sono stati calcolati considerando un'ipotesi tariffaria cautelativa di 0,41 €/kWh, essendo la potenza totale installata maggiore di 50 kW<sub>p</sub>, e un'ulteriore remunerazione di 0,16 €/kWh per il risparmio sui normali consumi. Ai benefici vanno infine sottratti i costi addizionali annui di gestione e manutenzione, che si assumono pari a circa l'1% dell'investimento iniziale.

Il calcolo del *Payback period* per le alternative progettuali esaminate è stato effettuato a prescindere dal tasso di interesse annuo e rinunciando a considerare il decadimento della produttività dell'impianto nel tempo, che peraltro è limitato (inferiore al 20% circa dopo 25 anni di esercizio): l'errore commesso è accettabile e il risultato ottenuto (Tab. 6) esprime con buona approssimazione il tempo necessario per recuperare l'investimento iniziale.

Tab. 6. Analisi di costi e benefici dell'impianto fotovoltaico

Alternativa	A	B
<b>Costi iniziali:</b>		
Moduli fotovoltaici (€)	598.920	710.875
Inverter (€)	63.735	71.230
Strutture fissaggio moduli e ancoraggio (€)	86.800	64.625
Progettazione, dir. lavori, collaudo (4%) (€)	29.980	33.870
<b>Totale costi iniziali (€) esclusa IVA 10%</b>	<b>779.435</b>	<b>880.600</b>
<b>Benefici:</b>		
Tariffa unitaria (€/kWh)	0,41	0,41
Tariffa risparmio consumi (€/kWh)	0,16	0,16
Produzione di energia (kWh/anno)	125.436	170.622
<b>Totale benefici annui lordi (€/anno)</b>	<b>71.500</b>	<b>97.255</b>
<b>Costi addizionali annui:</b>		
Costi di gestione e manutenzione (€/anno)	7.795	8.805
<b>Totale benefici annui netti (€/anno)</b>	<b>63.705</b>	<b>88.450</b>
<b>Recupero dell'investimento:</b>		
<b>Payback period (anni)</b>	<b>12,24</b>	<b>9,96</b>

## ASPETTI AMBIENTALI

### Emissioni inquinanti evitate

È possibile stimare la quantità di emissioni di anidride carbonica e di altre sostanze inquinanti, responsabili del fenomeno dell'effetto-serra, che possono essere evitate realizzando un impianto fotovoltaico.

Per produrre un kWh elettrico da combustibili fossili mediamente sono emessi nell'aria circa 0,55 kg di CO<sub>2</sub>: l'energia prodotta mediante tecnologia fotovoltaica evita l'emissione di questa quota di anidride carbonica. Ipotizzando una produzione media annua, alle latitudini dell'Italia centrale, pari a circa 1.300 kWh con un impianto di potenza nominale da 1 kW<sub>p</sub>, complessivamente in un anno sono evitate emissioni di CO<sub>2</sub> pari a circa 715 kg per ogni kW di picco installato. Se si considera il ciclo di vita previsto per un impianto, pari a circa 30 anni, la stima complessiva a fine vita sarà di circa 21.450 kg di CO<sub>2</sub> evitati per ogni kW di picco installato.

Nel caso delle due alternative progettuali proposte, le emissioni di anidride carbonica evitate sono indicate in *Tab. 1*.

### Impatto visivo dei sistemi fotovoltaici

Data l'accurata scelta dei moduli, l'impatto visivo delle nuove installazioni risulterà estremamente contenuto, pur interessando una superficie estesa.

Inclinando il piano dei moduli di 30° rispetto all'orizzontale si ottiene un'altezza massima della superficie dei pannelli, rispetto alla base, di circa 0,204 m per l'alternativa *A* e di circa 0,361 m per l'alternativa *B*. Le soluzioni proposte sono entrambe accettabili ai fini della limitazione dell'ingombro e dell'impatto visivo dell'impianto, che risulta trascurabile per effetto della configurazione adottata. La scelta di moduli di dimensioni contenute posti su un piano inclinato implica infatti una minore visibilità del sistema, che sporge soltanto di pochi centimetri al di sopra delle coperture piane.

La realizzazione di impianti fotovoltaici, inoltre, comporta l'impiego di materiali e componenti innovativi, caratterizzati da particolari aspetti cromatici e percettivi. Nel caso di edifici di nuova costruzione, come per la stazione terminale Pian di Massiano del "Minimetrò", tali aspetti possono essere un contributo qualitativo alle caratteristiche estetiche dell'opera.

La valutazione finale del progetto dovrà quindi avvenire considerando l'impegno speso nell'integrazione di nuove tecnologie in un contesto di particolare pregio architettonico. Il progetto di integrazione dei moduli fotovoltaici sulle coperture del *terminal* di Pian di Massiano è stato sviluppato con un intervento che mira a rendere leggibili le valenze estetiche delle nuove tecnologie, minimizzando nel contempo le interferenze con le altre parti degli edifici.

## CONCLUSIONI

Le potenzialità di risparmio e produzione energetica, la facilità di integrazione architettonica e la praticità di installazione fanno del solare fotovoltaico una delle fonti energetiche rinnovabili più interessanti.

Sulla scia del successo ottenuto dal meccanismo di incentivazione in "conto energia", che remunera l'energia elettrica prodotta da fonte solare fotovoltaica, sono state presentate due alternative di progetto per un impianto fotovoltaico da integrare sulle coperture della stazione di Pian di Massiano, a Perugia, *terminal* dell'originale sistema di

trasporto "Minimetrò".

I moduli fotovoltaici saranno inclinati di 30° rispetto all'orizzontale e saranno esposti a Sud, perché si è osservato che tale configurazione rende massima l'energia captata nell'arco dell'anno. Grazie alla scelta di moduli di modesta altezza, l'intera struttura si eleverà dal limite superiore del prospetto degli edifici fuoriuscendo al massimo di circa 36 cm: l'impatto visivo dell'opera, quindi, sarà minimo. Inoltre, in virtù dell'installazione sulle coperture di una stazione del "Minimetrò", l'impianto assumerà una forte valenza dal punto di vista dell'innovazione tecnologica e della sensibilizzazione a problematiche di risparmio energetico e tutela ambientale.

Sulla base delle analisi svolte, l'alternativa progettuale *B* (moduli di altezza pari a 65,4 cm, potenza installata di 129,3 kW<sub>p</sub> e produzione di 170.622 kWh/anno) risulta più conveniente rispetto all'ipotesi *A* (moduli da 34 cm, potenza di 95,5 kW<sub>p</sub> ed energia pari a 125.436 kWh/anno), in quanto consente di ottenere una maggiore produzione di energia elettrica (+ 36%) e di conseguenza una maggiore riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub>. Inoltre, poiché per l'alternativa *B* il tempo di recupero dell'investimento iniziale è più breve (inferiore a 10 anni), tale impianto realizzerà un più elevato utile complessivo nella durata del "conto energia" (incentivo erogato per 20 anni) e nei successivi anni di funzionamento.

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1]. DM 28-07-05, Criteri per l'incentivazione della produzione di energia elettrica mediante conversione fotovoltaica della fonte solare, GU 05-08-05, n. 181.
- [2]. Delibera AEEG n. 188/05, Definizione del soggetto attuatore e delle modalità per l'erogazione delle tariffe incentivanti degli impianti fotovoltaici, in attuazione dell'art. 9 del decreto del MAP, di concerto con il MATT, 28-07-05, pubblicata il 14-09-05.
- [3]. DM 06-02-06, Modifica al Decreto 28-07-05, GU 15-02-06, n. 38.
- [4]. Delibera AEEG n. 40/06, Modificazione e integrazione alla deliberazione dell'AEEG 14-09-05, n. 188/05, in materia di modalità per l'erogazione delle tariffe incentivanti degli impianti fotovoltaici, 24-02-06.
- [5]. G.Drisaldi, Progetto esecutivo Minimetrò, Progetto esecutivo dell'impianto elettrico di alimentazione ad anello, Relazione tecnica, cod. E06, rev. 2, 2003.
- [6]. LEITNER, Progetto esecutivo Minimetrò, Gestione e manutenzione, 2003

## SUMMARY

The paper presents the plan of a photovoltaic system integrated on the terminal station roofing of "Minimetrò", an advanced and sustainable transport system in Perugia (Umbria, Italy). The terminal is situated in Pian di Massiano, a wide area in the city suburbs: it combines the greatest available roofing surface to the best exposure to solar radiation.

Two photovoltaic system plans were studied and compared in order to reduce visual effects and to support the electrical demand of station devices, offices, business activities and services. Finally, environmental and economical benefits were considered, concerning avoided CO<sub>2</sub> emissions and rate incentives, according to Decrees which introduced in Italy economic aid to photovoltaic technology.