

## **ANALISI DELLA PRODUCIBILITA' ENERGETICA DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI IN CONTESTI URBANI**

Maurizio Cellura\*, Aldo Orioli\*, Alessandra Di Gangi\*,

\*Università degli Studi di Palermo, Dipartimento dell'Energia, Viale delle Scienze, Edificio 9, 90128 Palermo;  
m.cellura@dream.unipa.it, orioli@dream.unipa.it, alessandradigangi@dream.unipa.it

### **SOMMARIO**

L'obiettivo del lavoro proposto è la definizione di una metodologia che consenta di testare il livello di integrazione della tecnologia fotovoltaica in contesti urbani ad alta densità edilizia. Il criterio adottato mira all'analisi contestuale dell'aspetto energetico, mediante valutazione della percentuale di copertura del fabbisogno di energia elettrica richiesto, e della convenienza economica degli impianti fotovoltaici installati sulle coperture degli edifici. A tal fine, per un quartiere della città di Palermo, sono state poste in relazione le superfici effettivamente disponibili all'installazione dei pannelli e il numero di utenze presenti. Le coperture, censite grazie all'ausilio delle immagini satellitari fornite da Google Maps™ e Google Earth™, sono state classificate secondo la forma, l'orientamento e l'inclinazione. Esiste un numero di piani degli edifici per il quale la taglia dell'impianto a disposizione del singolo proprietario e la conseguente produzione di elettricità non riescono ad ammortizzare i costi per l'installazione e la manutenzione dell'impianto, anche alla luce dell'eventuale surplus di energia venduto alla rete e degli incentivi erogati dal Conto energia recentemente rinnovato. In ragione di ciò, è stato indagato il fattore della resa derivante dal confronto della produttività degli impianti installabili con i consumi di energia elettrica e ulteriormente approfondito alla luce degli aspetti di natura stringatamente finanziaria. Di questo parametro ne è stata esaminata anche la sua sensibilità alla variazione dei fattori che condizionano l'esito dell'analisi, quali il mismatch e l'ombreggiamento delle superfici.

### **1. INTRODUZIONE**

L'approvvigionamento energetico a livello globale dipende ancora oggi eccessivamente dalle fonti fossili, mentre le rinnovabili giocano un ruolo irrisorio. Secondo l'Agenzia Internazionale dell'Energia [1] la prima fonte energetica rimane il carbone, salito negli ultimi 12 anni dal 38,4% al 40,3%. La seconda fonte energetica è il gas, con un incremento dal 15,8% al 20,8%. Il petrolio ha un ruolo meno incisivo essendo sceso dall'8,9% al 4,7% anche se è immaginabile un prossimo recupero in vista della riapertura di vecchie centrali come conseguenza dell'emergenza nucleare in Giappone. In progressiva riduzione dal 18,3% al 16,6% è il peso dell'idroelettrico, mentre l'apporto delle fonti rinnovabili è raddoppiato dall'1,4% al 3,3% con un aumento nel 2010 del 120% rispetto all'anno precedente. Alla luce dei dati statistici illustrati, sostenere le tecnologie alimentate dalle fonti rinnovabili diviene pertanto fondamentale per conseguire gli ambiziosi obiettivi fissati in ambito comunitario con la direttiva 2009/28/CE "Obiettivi e misure nazionali generali obbligatori per l'uso dell'energia da fonti rinnovabili", pubblicata sulla G.U.C.E., la Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea, il 5 giugno 2009 (L 140/16), che stabilisce che la quota di energia

da fonti rinnovabili sul consumo finale di energia nel 2020 copra almeno il 17%. In Italia questo sostegno è diventato ondivago e contrassegnato da una estrema variabilità tendente al ribasso. Sebbene siano stati erogati inizialmente incentivi consistenti, si è assistito di recente ad un taglio repentino con il decreto del 3 marzo 2011 e infine rinviata ogni decisione, eludendo certezze e garanzie. Alla luce di quanto esposto, appare urgente che i governi dichiarino concretamente i costi e i benefici delle diverse opzioni. Per ciò che attiene al fotovoltaico, in particolare, bisogna che si definisca quanto, a fronte di una realistica produzione di energia elettrica, l'installazione dell'impianto risulti effettivamente conveniente.

Per raggiungere tale intento è necessario individuare la scala opportuna del campo di applicazione in grado di far evincere, attraverso la schematizzazione di criteri dichiarati, risultati generalizzabili e quindi chiaramente indicativi delle condizioni esistenti nei contesti di riferimento. Molteplici sono le esperienze relative all'integrazione dei sistemi fotovoltaici sugli edifici. Ma spesso trapela un orientamento semplificato e approssimato, ovvero riconducibile a singoli casi i cui dati sono difficilmente generalizzabili. Infatti, gli approcci seguiti sono avulsi, per un verso o per un altro, dagli

aspetti determinanti ai fini di una interpretazione corretta ed appropriata del fenomeno. In particolare, se la scala di dettaglio applicata a una singola abitazione unifamiliare consente di controllare con estrema precisione i dati prestazionali di tutti i componenti del sistema fotovoltaico nonché gli eventuali effetti ombreggianti, l'inclinazione, l'orientamento dei pannelli, i costi di iniziali e quelli successivi di manutenzione dell'impianto, tuttavia le informazioni sulla resa prodotta non sono estendibili e quindi non possono essere esemplificative del comportamento e del grado di integrazione del fotovoltaico in un contesto urbano, ma riferibili solo al caso specifico analizzato [2], [3], [4]. D'altra parte il filone di studi inerente alla valutazione della disponibilità energetica delle superfici si riferisce al singolo appartamento [5], o edificio [6], ovvero a porzioni di città avvalendosi della costruzione di modelli tridimensionali finalizzati allo studio dell'effetto ombreggiante [7], [8], [9], [10], presupponendo una semplificazione che inficia la precisione dei risultati. Spesso, viene assunta come nota la superficie effettiva per l'installazione dei pannelli [11], [12], quando in realtà è necessario calcolarla ai fini di un corretto dimensionamento dell'impianto. In alcuni studi la superficie disponibile è stata stimata in 18-24% per le coperture a falda e 50-70% per le coperture piane [13], o 79-98% e 65-80% rispettivamente, in relazione alla tipologia [14]. L'altro aspetto affrontato coinvolge le dinamiche economiche connesse all'erogazione degli incentivi a favore dell'installazione degli impianti fotovoltaici. Papadopoulos et al. [15] hanno affrontato il caso della Grecia; Campocchia et al. [16] hanno confrontato le misure adottate in Francia, Germania, Italia e Spagna. Dusonchet et al. [17], [18] hanno esteso l'analisi a 27 paesi della Comunità Europea. Dallo studio della bibliografia esistente emerge chiaramente quanto gli aspetti che entrano in gioco per una descrizione esaustiva dell'effettivo grado di integrazione dei sistemi fotovoltaici nel contesto urbano, peraltro fortemente significativo ai fini della validità delle informazioni prodotte per l'elevata concentrazione della popolazione e dei relativi consumi di energia elettrica, siano molteplici. La metodologia che di seguito si descrive mette in relazione tutti gli ambiti coinvolti, da quello meramente energetico a quello architettonico ed economico, analizzandoli contestualmente.

## 2. LA METODOLOGIA

La metodologia prevede le seguenti fasi esecutive:

1. censimento delle coperture piane e a falda con identificazione delle relative superfici e del numero di piani coperti;
2. classificazione delle tipologie di copertura secondo l'orientamento, l'inclinazione e la conformazione;
3. calcolo della producibilità dell'impianto fotovoltaico in relazione alla taglia attribuita a ciascun piano;
4. identificazione dei consumi di energia elettrica;
5. analisi economica;
6. calcolo della copertura del fabbisogno energetico in relazione alla convenienza economica dell'investimento.

## 3. L'AREA-STUDIO

La metodologia proposta è stata applicata in un quartiere della città di Palermo.

### 3.1 Censimento delle coperture piane e a falda.

Il quartiere analizzato ricade in un'area di espansione, risalente ai primi decenni del 1900, caratterizzata da edifici dal contenuto numero di piani e coperture prevalentemente a falda di proprietà condominiale. Successivamente, parte di tale edilizia è stata progressivamente sostituita da edifici con un maggior numero di piani attribuibile alle moderne tecniche costruttive. Tali edifici presentano coperture piane e si attestano secondo l'orientamento regolare del tracciato ortogonale originario.



Fig. 1. L'area-studio

Attraverso l'utilizzo delle immagini satellitari fornite da Google Maps<sup>TM</sup> opportunamente scalate, sono stati agilmente ricavati: l'estensione del quartiere quantificata in 268.879 mq (Fig.1), l'area edificata corrispondente a 109.207 mq (Fig.2) pari al 41% (Fig.3) dell'intero lotto, nonché la distribuzione delle superfici delle coperture a falda e piane all'interno dell'area edificata risultante, rispettivamente, pari al 55% e 35% (Fig.4). La percentuale del 10% è riferita alle terrazze private e quindi di uso esclusivo. Con l'ausilio di Street View, strumento disponibile in Google Map<sup>TM</sup>, si è avuta contezza del numero dei piani dei singoli edifici esaminati, consentendo così di determinare la distribuzione delle superfici delle coperture in relazione al numero di piani presenti (Fig.5). E' netta la prevalenza dei tetti a falda degli edifici di 4 piani in misura pari al 21,4% e delle coperture piane che ricoprono 8 piani in misura pari al 14,6%.

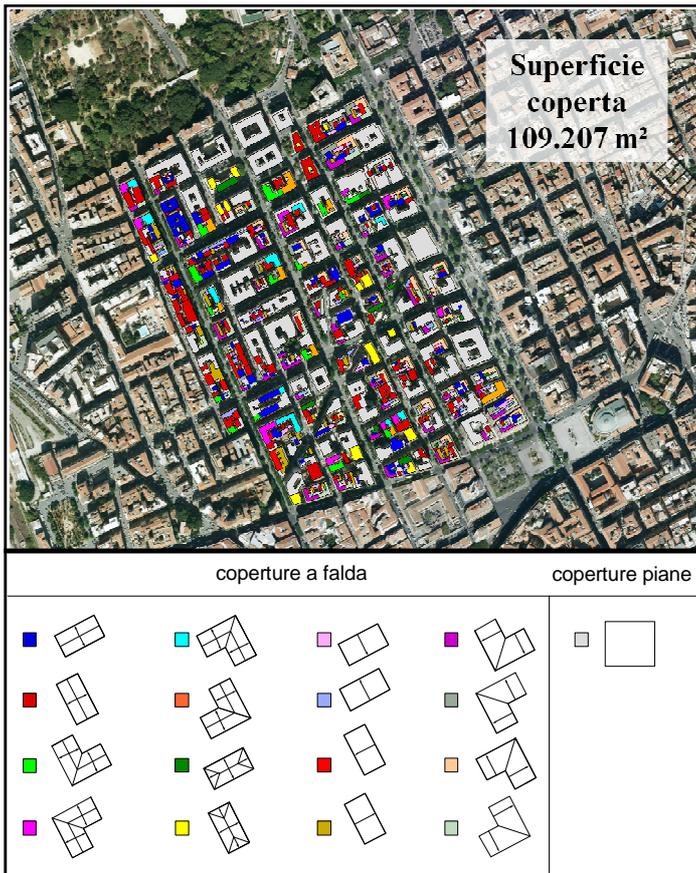


Fig. 2. L'area-studio con l'individuazione della superficie coperta

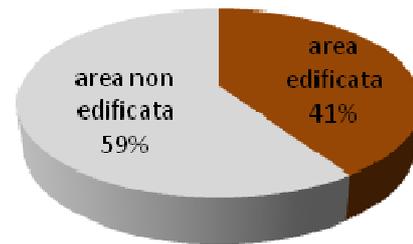


Fig. 3. Distribuzione della superficie edificata nel lotto

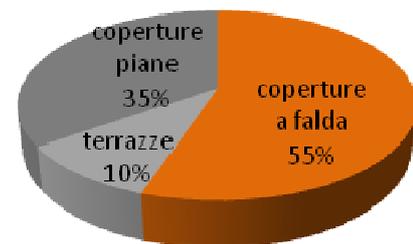


Fig. 4. Distribuzione della superficie di coperture

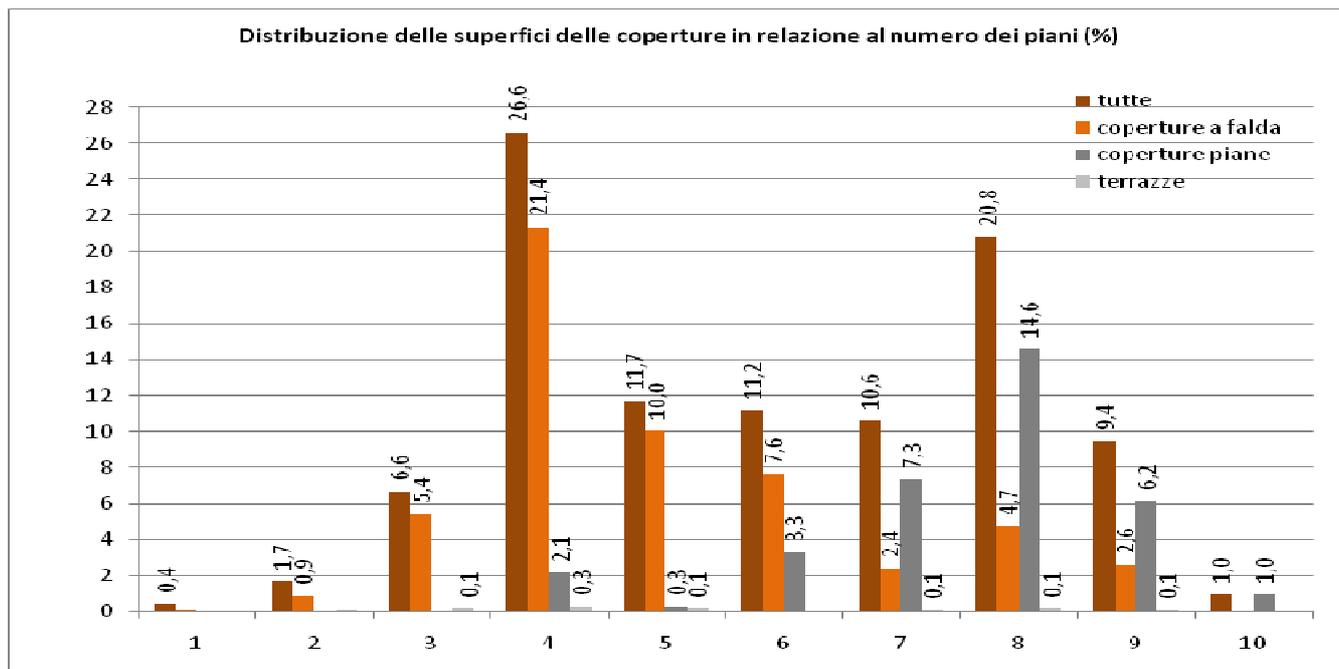


Fig.5. Distribuzione delle superfici delle coperture in relazione al numero di piani

### 3.2 Classificazione delle tipologie di copertura.

Preliminarmente è necessario effettuare un'indagine rispetto alla morfologia delle coperture degli edifici al fine di identificare con precisione le effettive superfici disponibili per l'installazione dei pannelli fotovoltaici. Le conformazioni delle coperture del sito urbano esaminato, seppur complesse e differenziate in parti molto diverse nelle loro caratteristiche formali, presentano proprietà comuni che possono essere ricondotte ad un definito numero di tipologie. Di seguito sono descritti i criteri di classificazione adottati per le coperture a falda e quelle piane.

#### Coperture a falda

Assunti un orientamento prevalente degli edifici ruotato di 117° a Sud-Ovest, un'inclinazione delle falde pari a 25° rispetto al piano dell'orizzonte, una differenziazione secondo la conformazione della falda (doppia e singola) e una disposizione contraddistinta dall'andamento in testata d'angolo e completamente allineata alla strada, sono state desunte 16 tipologie di falda: T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8, T9, T10, T11, T12, T13, T14, T15, T16 (Tab.1).

Tab.1. Classificazione delle coperture a falda

T1 (8162 m <sup>2</sup> ) 	T2 (12901 m <sup>2</sup> ) 	T3 (2690 m <sup>2</sup> ) 	T4 (2031 m <sup>2</sup> ) 
T5 (2144 m <sup>2</sup> ) 	T6 (2219 m <sup>2</sup> ) 	T7 (1582 m <sup>2</sup> ) 	T8 (2880 m <sup>2</sup> ) 
T9 (2296 m <sup>2</sup> ) 	T10 (1683 m <sup>2</sup> ) 	T11 (3298 m <sup>2</sup> ) 	T12 (2906 m <sup>2</sup> ) 
T13 (3787 m <sup>2</sup> ) 	T14 (3765 m <sup>2</sup> ) 	T15 (3618 m <sup>2</sup> ) 	T16 (4183 m <sup>2</sup> ) 

Le superfici delle tipologie di falda risultano equamente distribuite ad eccezione delle tipologie T1 e T2 che risultano prevalenti in quantità rispettivamente del 14% e 21% (Fig.6).

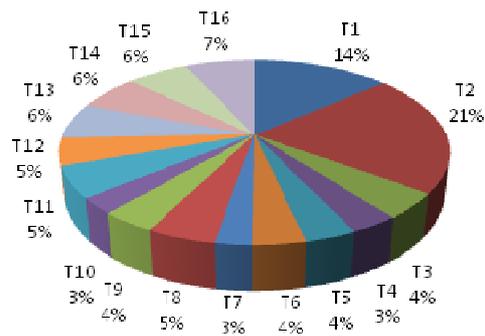


Fig. 6. Distribuzione delle superfici delle tipologie a falda

#### Coperture piane

Per le coperture piane è stata prevista la suddivisione in cinque sottogruppi comprendenti lo stesso numero di edifici. Per ciascun gruppo è stato successivamente identificato l'edificio rappresentativo come media delle superfici che risultano avere un'estensione pari a 265 m<sup>2</sup>, 387 m<sup>2</sup>, 482 m<sup>2</sup>, 717 m<sup>2</sup> e 1394 m<sup>2</sup> (Tab.2)

Tab.2. Classificazione delle coperture piane

D60 265 m <sup>2</sup> 	E76 387 m <sup>2</sup> 	A66 482 m <sup>2</sup> 	D74 717 m <sup>2</sup> 	A8 1394 m <sup>2</sup> 
-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------	-------------------------------

### 3.3 La producibilità degli impianti fotovoltaici

#### Coperture a falda

L'attenta considerazione degli spazi necessari per le manovre di montaggio e manutenzione degli impianti rispetto alla conformazione delle falde è determinante per calcolare il numero dei pannelli installabili. Per questo è stata considerata la possibilità che la falda di riferimento proseguo o meno, ovvero vi sia un edificio adiacente a quota differente.

Ciò, infatti, implica il rispetto di distacchi dai confini delle proprietà in misura differente. Tali valori sono illustrati in Tabella 3.

Tab.3. Distacchi da rispettare in funzione della continuità o meno della falda di riferimento

Distacchi (m)					
continua	non continua	continua	non continua	continua	non continua
0,3	1,2	0	0,3	0	0

La producibilità degli impianti è stata espressa come media aritmetica dei valori ottenuti considerando il numero di pannelli installabili nelle due condizioni. La taglia dell'impianto, dimensionata in funzione del numero di piani coperti dalla falda, e quindi delle effettive porzioni di tetto di pertinenza di ciascun appartamento, è stata calcolata considerando:

- la superficie per singola tipologia di falda pari a 162 mq, corrispondente alla estensione media degli appartamenti tipici dell'epoca;
- il pannello Kyocera KD210GH-2P di potenza nominale 210Wp e dimensioni 0,99m x 1,50m.

I calcoli relativi alla producibilità degli impianti in funzione dei piani (Tab.4.) sono stati effettuati mediante il software PvSyst 5.06 a partire dai dati mensili di radiazione solare diretta e diffusa su una superficie orizzontale riferiti ad un anno tipo (Meteonorm).

Tab.4. Coperture a falda: producibilità degli impianti in relazione al numero dei piani

Coperture a falda	superficie (m <sup>2</sup> )	Energia producibile dalle superfici effettivamente presenti (KWh)
piani		
1	64	5266,96
2	934	41300,53
3	5923	149476,55
4	23316	512594,78
5	10947	163643,40
6	8320	78456,53
7	2658	22470,96
8	5158	44347,64
9	2825	10223,05
Totale	60145	1027780,40

### Coperture piane

Nel caso delle coperture piane la producibilità dell'impianto fotovoltaico (Tab.5) è stata stimata considerando:

- la superficie dell'appartamento tipo pari a 162 mq;
- il pannello Kyocera KD210GH-2P di potenza nominale 210Wp e dimensioni 0,99m x 1,50m, orientato a Sud e inclinato di 30° rispetto all'orizzonte;
- gli ombreggiamenti provocati dalla presenza dei torrioni dell'ascensore e i parapetti degli edifici.

Tab.5. Coperture piane: producibilità degli impianti in relazione al numero dei piani

Coperture piane	superficie (m <sup>2</sup> )	Energia producibile dalle superfici effettivamente presenti (KWh)
piani		
1	0	0,00
2	0	0,00
3	0	0,00
4	2319	43090,88
5	320	3014,04
6	3581	45646,84
7	8011	89973,85
8	15911	165323,55
9	6718	55099,39
10	1042	7572,44
Totale	37902	409721,00

In particolare le distanza  $d$  dei pannelli dai filari e dagli oggetti ostruenti sono state calcolate evitando l'ombreggiamento prodotto dalle ore 10:00 alle ore 14:00 del solstizio di inverno secondo relazione fornita dalla norma Cei 82-25:

$$d/h = \sin(T) * \tan(23,5^\circ + \text{latitudine}) + \cos(T)$$

in cui  $h$  è la distanza tra i filari,  $h$  è l'altezza dei pannelli e  $T$  l'angolo di inclinazione dei pannelli.

All'aumentare del numero dei piani dell'edificio la superficie di tetto di pertinenza di ciascun utenza diminuisce proporzionalmente, ma il numero dei pannelli installabili, nonché la relativa produttività e i costi dell'impianto, non seguono un andamento altrettanto lineare e costante. Come si evince dalle Fig.(7-8) infatti, la producibilità dei pannelli in rapporto al numero dei piani e i relativi costi dei componenti dell'impianto fotovoltaico, ottenuti dall'indagine di mercato (Tab.6), subiscono una riduzione progressiva in presenza di edifici fino ai 5 piani; dal 6° all'8° piano si attestano su valori simili per poi diminuire nuovamente in corrispondenza dei 9 piani.

Tab.6 Prezzi dei componenti dell'impianto fotovoltaico

Prezzi dei componenti dell'impianto
Pannello 210 Wp: 384,73 €/cad.
Inverter (3KW): 2109,94 €/cad.
Quadro di campo: 842,00 €/cad.
Cablaggi: 3- 2,10€/m
Connettori: 12,00 €/cad.
Sistema di fissaggio copertura a falda: 283,33 €/KWp
Sistema di fissaggio copertura piana: 494,33 €/KWp

Lo stesso avviene per le coperture piane in cui fino al 5° piano si ha una diminuzione consistente, mentre dal 6° al 10° piano le variazioni sono minime. E' evidente quanto la percentuale di copertura del fabbisogno di energia elettrica, connessa alla producibilità dell'impianto, e la convenienza economica, vincolata ai costi dell'investimento, siano subordinati a tali oscillazioni. I risultati dello studio, dunque, possono essere desunti in modo corretto e appropriato solo attraverso una specifica ed accurata analisi delle differenti condizioni attinenti al numero dei piani presenti nell'edificio.

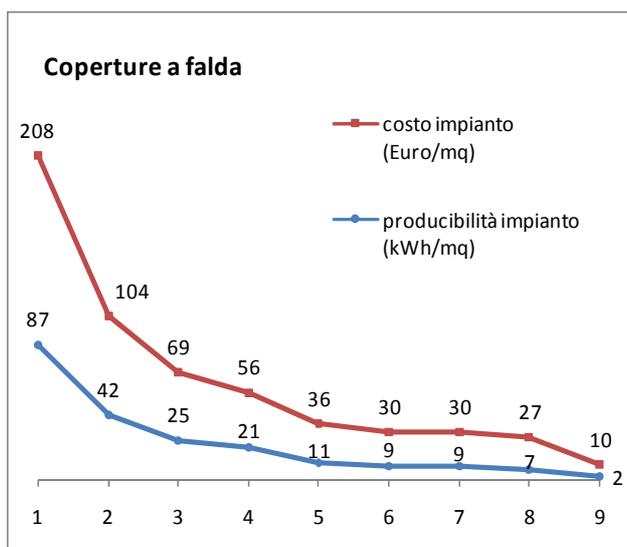


Fig. 7. Coperture a falda: variazione della produttività e dei costi degli impianti in relazione al numero dei piani

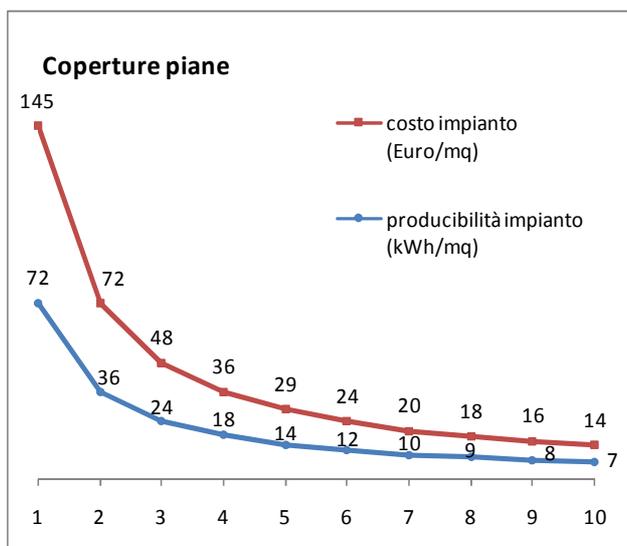


Fig. 8. Coperture piane: variazione di costi e della produttività degli impianti in relazione al numero dei piani

### 3.4 Consumi di energia elettrica

Il profilo dei consumi di energia elettrica è stato ricavato dai dati annuali forniti da Terna, la società che gestisce la rete di trasmissione nazionale. Secondo la pubblicazione "Dati Statistici sull'Energia elettrica in Italia" redatta per l'anno 2008, il consumo di energia elettrica nella provincia di Palermo, relativamente al settore domestico, risulta essere pari a 1475,80 GWh/anno (Tab.7). I rilevamenti Istat forniscono un numero dei residenti nella provincia di Palermo pari a 1.244.680 abitanti. Ne deriva un consumo di energia elettrica per abitante di 1185,69 kWh/anno.

Tab.7. Consumi, superficie e residenti (Fonte TERNIA e ISTAT)

Consumi di energia elettrica della provincia di Palermo	1475,80 GWh/anno
Superficie abitazione occupate dai residenti del comune di Palermo	22.141.320 m <sup>2</sup>
Residenti della provincia di Palermo	1.244.680 ab
Residenti del comune di Palermo	686.711 ab

Poiché, dagli stessi rilevamenti Istat, la superficie delle abitazioni occupate dai residenti del comune di Palermo è di 22.141.320 mq e il numero di residenti è di 686.711, se ne può determinare la superficie per abitante residente corrispondente a 32,24 m<sup>2</sup>. Assunto che la superficie dell'appartamento tipo è pari a 162 m<sup>2</sup> si ricava la densità per appartamento di 5,02 abitanti. Moltiplicando tale valore per il consumo annuo per abitante si ottiene il fabbisogno di elettricità dell'appartamento tipo, quantificata in misura pari a **5.957,30 kWh/anno**.

### 3.5 Analisi economica

Quando si intraprende un investimento finalizzato all'installazione di un impianto fotovoltaico, il principale problema è definire un criterio che consenta di valutare la sua competitività attraverso un'analisi di redditività. Nel caso in esame, i profitti derivano dai consumi di elettricità coperti dall'impianto fotovoltaico e quindi risparmiati in bolletta, dalla vendita al GSE dell'eventuale energia prodotta e non consumata, e dagli incentivi erogati dal Conto energia (Dm. 6 agosto 2010) (Tab.8) per gli impianti installati a partire dal 1° gennaio 2011.

Tab. 8. incentivi erogati (Conto Energia D.m. 6 agosto 2010)

Potenza (KW)	impianti entrati in esercizio in data successiva al 31 dicembre 2010 ed entro il 30 aprile 2011	
	impianti fotovoltaici realizzati sugli edifici €/KWh	altri impianti fotovoltaici €/KWh
1=P = 3	0,402	0,362
3 < P = 20	0,377	0,339
20 < P = 200	0,358	0,321
200 < P = 1000	0,355	0,314
1000 < P = 5000	0,351	0,313
P > 5000	0,333	0,297

I costi attongono all'investimento iniziale per l'acquisto e l'installazione dell'impianto, alle spese regolari dovute alla manutenzione ed esercizio dell'impianto, all'assicurazione e alle sostituzioni per usura dei pannelli e dell'inverter. Tutti questi fattori sono tradotti in flussi di cassa, che esprimono le differenze tra i costi e i guadagni, e utilizzati per valutare l'opportunità economica attraverso il criterio del VAN (valore attuale netto), del TIR (tasso interno di rendimento) e del payback period (tempo richiesto per recuperare il capitale investito). I calcoli sono stati effettuati ipotizzando una durata media dell'impianto pari a venti anni e considerando i seguenti parametri:

- perdita di efficienza dei pannelli pari all'1% all'anno del valore nominale
- costi di manutenzione ed esercizio pari al 2% del costo iniziale;
- sostituzione dei pannelli per usura pari all'1% all'anno dei pannelli installati;
- sostituzione dell'inverter per usura al 6°, 11° e 16° anno;
- tasso di inflazione pari al 2,1%;
- tasso di sconto pari al 3,36%;
- aumento del costo del kWh pari al 5,2%.

La non contemporaneità dei consumi di energia elettrica rispetto alla produzione dell'impianto fotovoltaico, che incide sulla quota di energia venduta alla rete nonché sul calcolo della bolletta risparmiata, presupporrebbe lo studio del profilo dei consumi orari, ma ciò prescinde dall'intento di questo lavoro che definisce un metodo di supporto alla pianificazione degli interventi nel settore fotovoltaico a scala urbana e/o di quartiere. Una descrizione dettagliata implicherebbe la conoscenza delle abitudini di ciascuna famiglia ed avrebbe senso solo se riferita all'analisi di una singola abitazione che di certo non può essere assunta a modello rappresentativo del comportamento collettivo. Il grado di approfondimento della questione legata al mismatch,

quindi, pur non addentrandosi in una lettura istantanea dei consumi, assume altrettanta validità estendibile alla totalità degli utenti. Si assume, infatti, che la quantità di energia consumata durante la notte sia sicuramente immessa in rete data l'inefficienza dell'impianto fotovoltaico in tale periodo.

Si ipotizza, inoltre, che i consumi nelle abitazioni tipo riferibili alle lampade, al frigorifero e al computer siano rispettivamente:

- lampade: 85W dal tramonto alle 23:00-dalle 7:00 all'alba
- frigorifero: 90W dal tramonto alle 24:00-dalle 0:00 all'alba
- computer: 75W dal tramonto alle 23:00-dalle 0:00 all'alba

Più precisamente, poiché l'energia elettrica generata dall'impianto è minima all'inizio e alla fine della giornata, l'ora dell'alba e del tramonto (riferite al 15 di ogni mese) sono state rispettivamente posticipata e anticipata e di un'ora. In tal modo si è ottenuto che il fabbisogno di energia notturna è pari a 716,5 kWh/anno, che sottratta al fabbisogno totale pari a 5.957,30 kWh/anno fornisce il fabbisogno diurno pari a 5240,8 kWh/anno. La percentuale di copertura del consumo diurno è stata assunta pari a 0%. In accordo a tali ipotesi, l'analisi economica ha prodotto un valore di VAN positivo solo per gli edifici fino a 4 piani (Fig.9), mentre per gli edifici con copertura piana il VAN è risultato positivo fino ai 5 piani (Fig.10).

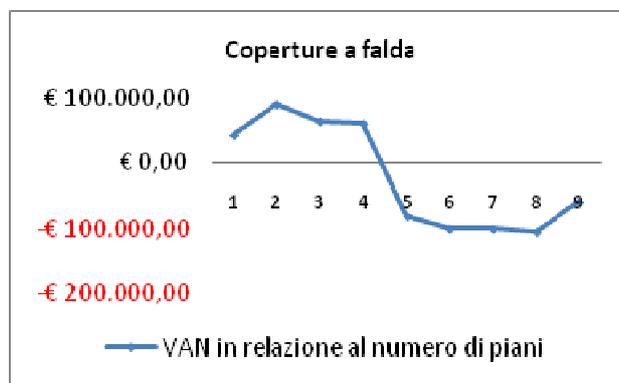


Fig. 9. Coperture a falda: variazione del VAN

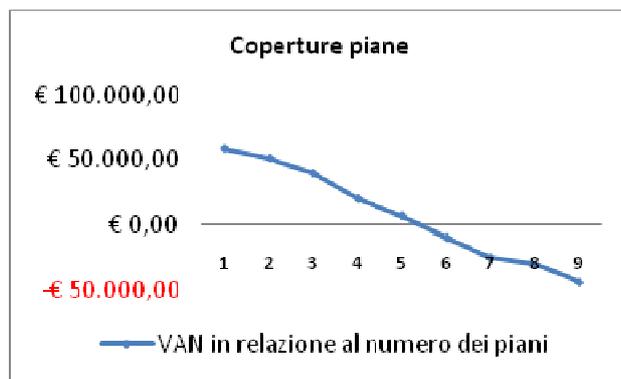


Fig. 10. Coperture piane: variazione del VAN

## 4. RISULTATI

### 4.1 Copertura del fabbisogno energetico in relazione alla convenienza economica dell'investimento

La percentuale di copertura del fabbisogno di energia elettrica è stata analizzata prendendo a riferimento l'obiettivo del 17% imposto dalla direttiva citata in precedenza. L'energia prodotta dagli impianti installati nelle coperture del lotto (*E*) è stata rapportata ai consumi effettivi degli utenti (*F*) secondo la relazione:

$$C = E/F \cdot 100$$

Per le superfici di proprietà dei singoli appartamenti che non riescono a coprire integralmente la richiesta di energia è determinante lo studio dei flussi di cassa precedentemente descritto per dimostrare, a fronte di una parziale copertura di energia elettrica, la convenienza dell'investimento. Quindi, per consentire di mettere in relazione i risultati energetici con gli economici, si è assunta nulla la producibilità degli impianti fotovoltaici il cui valore di VAN risulta negativo. Nella condizione di VAN positivo, cioè di reale convenienza economica, si è mantenuta la producibilità calcolata. Nelle Tab. 9-10, rispettivamente riferite alle coperture a falda e alle coperture piane, è riportata la copertura del fabbisogno annuo di energia elettrica riferita alle superfici effettivamente presenti nel lotto. Gli effetti dell'incidenza dell'analisi economica, evidenziati nell'ultima colonna delle suddette tabelle, sono illustrati graficamente nelle Fig. 11-12.

Tab.9. Coperture a falda: copertura del fabbisogno energetico in relazione ai piani

Coperture a falda	Effettiva copertura del fabbisogno annuo di energia elettrica (%)	Energia prodotta dalle superfici secondo convenienza economica (KWh)	Effettiva copertura del fabbisogno annuo di energia elettrica secondo convenienza economica (%)
1	0,24	0,00	0,00
2	1,87	41300,53	1,87
3	6,76	147656,06	6,68
4	23,18	491254,15	22,21
5	7,40	134301,04	6,07
6	3,55	13654,27	0,62
7	1,02	615,56	0,03
8	2,01	3313,38	0,15
9	0,46	0,00	0,00
Totale	46,47	832094,99	37,63

Dagli istogrammi è immediato rilevare che la maggiore percentuale di energia elettrica per ciò che concerne le coperture a falda è fornita dagli edifici a 4 piani (23,2%) i cui

utenti non soltanto riescono a compensare la loro domanda di energia ma, altresì, ricavano un vantaggio economico dall'investimento. Per gli edifici di 2, 3, 5 e 6 piani benché risulti altrettanto efficace l'installazione dell'impianto fotovoltaico, tuttavia il contributo di energia apportato è notevolmente inferiore. Per quanto riguarda le coperture piane, le uniche superfici economicamente convenienti sono riferibili agli edifici di 4 e 5 piani, anche se la percentuale di copertura del fabbisogno è alquanto irrilevante (3,09% e 0,22%). In Fig. 13 è sono illustrate graficamente le percentuali di copertura del fabbisogno di energia elettrica del quartiere in relazione al numero dei piani degli edifici con copertura piana e a falda.

Tab.10. Coperture piane: copertura del fabbisogno energetico in relazione ai piani.

Coperture piane	Effettiva copertura del fabbisogno annuo di energia elettrica (%)	Energia prodotta dalle superfici secondo convenienza economica (KWh)	Effettiva copertura del fabbisogno annuo di energia elettrica secondo convenienza economica (%)
1	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00
4	3,09	43090,88	3,09
5	0,22	0,00	0,00
6	3,28	34674,68	2,49
7	6,46	33531,51	2,41
8	11,86	0,00	0,00
9	3,95	23740,72	1,70
10	0,54	0,00	0,00
Totale	29,40	135037,79	9,69

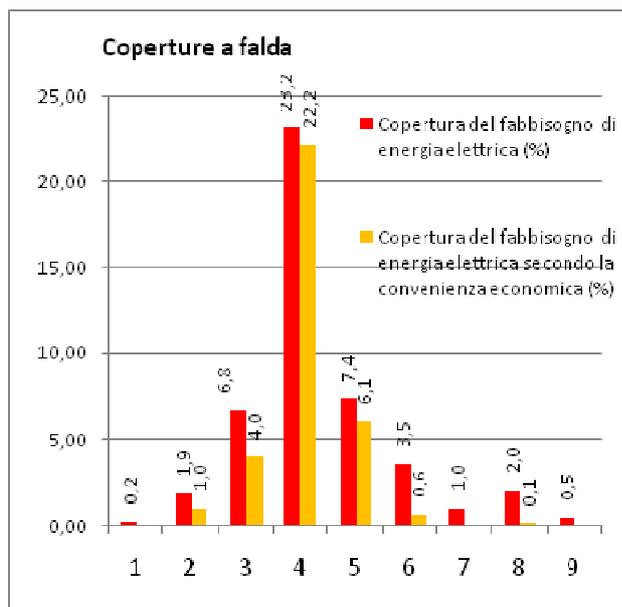


Fig. 11. Coperture a falda: copertura del fabbisogno energetico in relazione al numero di piani

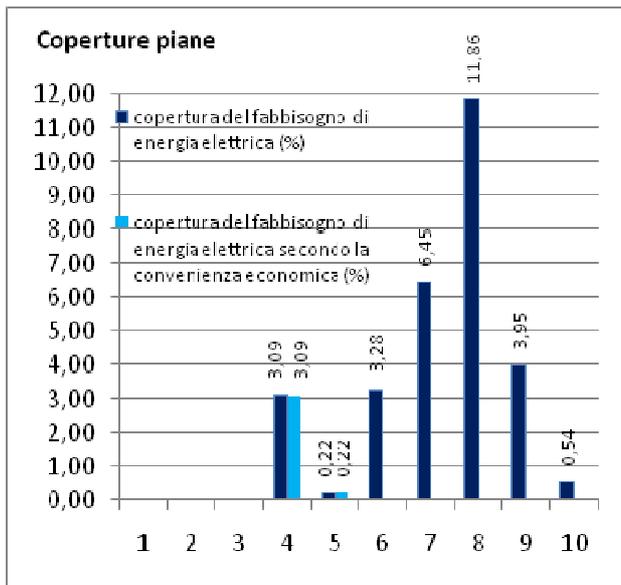


Fig. 12. Coperture piane: copertura del fabbisogno energetico in relazione al numero di piani

Gli impianti fotovoltaici riescono a coprire complessivamente il 35,80% del fabbisogno di energia elettrica del lotto, ma la stima si attesta al 24,08% per effetto dell'incidenza degli aspetti economici. Tale valore si riduce ulteriormente se si fa riferimento alla presenza di ombreggiamenti dovuti ad edifici adiacenti e alla variazione del mismatch. In particolare, con una percentuale di mismatch pari al 40% la copertura scende al 23,45% per attestarsi al 21,43% in presenza anche di una percentuale di ombreggiamento pari al 5%. In tale condizione, anche l'apporto energetico subisce una riduzione, producendo una copertura del fabbisogno energetico pari al 21,43%.

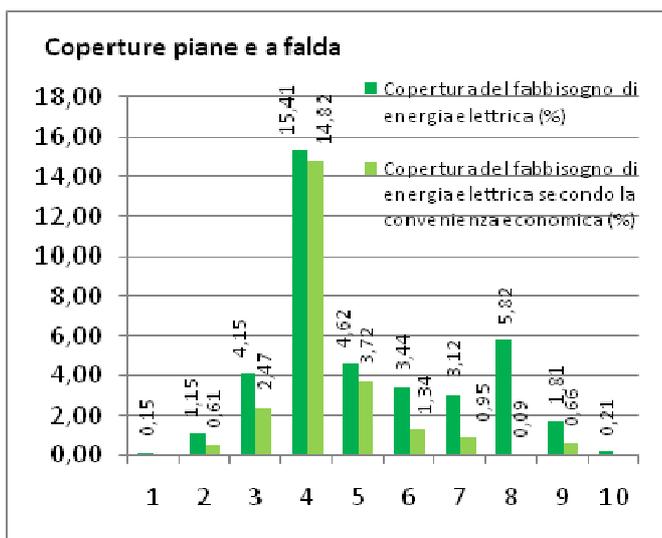


Fig. 13. Coperture piane: copertura del fabbisogno energetico in relazione al numero di piani

## 5. CONCLUSIONI

E' stata descritta una metodologia applicabile ai contesti urbani con elevata densità edilizia e riferibile al singolo utente di un condominio che intende valutare il contributo energetico ed economico dell'installazione di un impianto fotovoltaico nella porzione di copertura di sua pertinenza, nonché alle amministrazioni e ai gestori di rete chiamati a definire in modo realistico le potenzialità energetiche e le relative quantità di energia elettrica immesse in rete a partire dalle caratteristiche proprie dell'area urbana di riferimento.

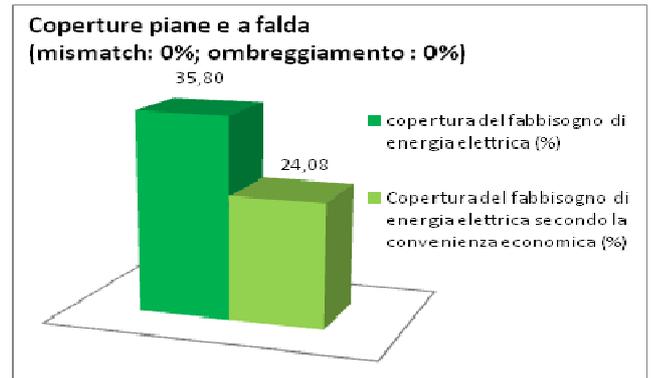


Fig. 14. Copertura del fabbisogno energetico nel lotto

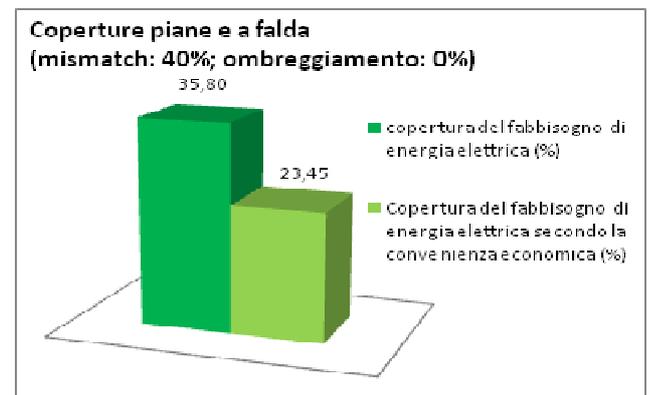


Fig. 15. Copertura del fabbisogno energetico nel lotto

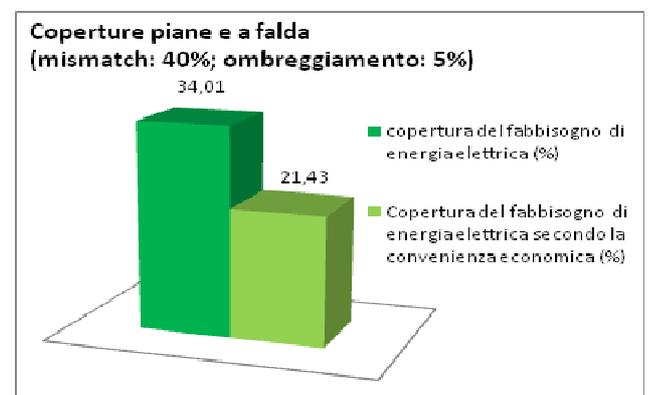


Fig. 16. Copertura del fabbisogno energetico nel lotto

La metodologia, in questo studio applicata ad un quartiere di Palermo, si avvale di uno strumento facilmente accessibile quale Google Map<sup>TM</sup>. A fronte della complessità del fenomeno, che implica l'interazione di molteplici fattori quali la definizione degli aspetti di natura architettonica, riconducibili alla individuazione e classificazione delle superfici di copertura utili all'installazione degli impianti per ciascuna utenza servita, di natura energetica, con la stima della produttività degli impianti di pertinenza di ciascun piano coperto dal tetto dell'edificio e di natura economica mediante l'analisi dei flussi di cassa, il metodo fornisce risultati precisi ed affidabili. L'analisi ha determinato la percentuale di copertura del fabbisogno energetico del quartiere successivamente ricalcolata in funzione della convenienza economica derivante dall'installazione degli impianti fotovoltaici. Questo ulteriore approfondimento ha rivelato la marcata incidenza sull'esito delle stime meramente energetiche ridimensionando i risultati ottenuti che, tuttavia, anche alla luce di eventuali ombreggiamenti e alla presenza di mismatch rispettano l'obiettivo imposto dalla direttiva comunitaria 2009/28/CE.

## SUMMARY

This study presents a methodology that permits to test the level of integration of the photovoltaic technology in urban areas. The criterion adopted allows both the energy assessment, based on the percentage of coverage of the electricity demand, and the economic feasibility of grid-connected photovoltaic systems installed on the roofs of buildings. To reach the purpose, the available areas for installation of PV panels were related to the number of users in a district of the city of Palermo. The roof surfaces, surveyed with the aid of satellite images provided by Google Maps<sup>TM</sup> and Google Earth<sup>TM</sup>, were classified according to their orientation and tilt. Even considering the incentives provided by the recently renovated "Conto Energia" for the surplus energy exported to the grid, it always exists a number of floors in correspondence of which the size of the PV system that may be installed, and the consequent production of electricity, does not recover the costs for installation and maintenance of the system. For this reason, the ratio of the productivity of the PV systems and the consumption of electricity of the households was analyzed considering the all economic aspects. It was also examined the sensitivity of the energy and economic analysis to the most significant factors influencing the results, such as the mismatch between generated and consumed electricity and the shading due to the surroundings surfaces.

## NOMENCLATURA

C Copertura del fabbisogno (%)  
 E Energia elettrica prodotta (kWh)  
 F Consumi di energia elettrica (kWh)

## RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

1. 2010 key World Energy Statistics, IEA International Energy Agency.

2. Celik A. N., 2006. Present status of photovoltaic energy in Turkey and life cycle techno-economic analysis of a grid-connected photovoltaic-house. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 10, 370–387.
3. Muñoz F.J., Echbarthi I., Nofuentes G., Fuentes M., Aguilera J., 2009. Estimation of the potential array output charge in the performance analysis of stand-alone photovoltaic systems without MPPT (Case study: Mediterranean climate). *Solar Energy* 83, 1985–1997.
4. Mavromatakis F., Makrides G., Georghiou G., Pothrakis A., Franghiadakis Y., Drakakis E., Koudoumas E., 2010. Modeling the photovoltaic potential of a site. *Renewable Energy* 35, 1387–1390.
5. Al-Salaymeh A., Al-Hamamre Z., Sharaf F., Abdelkader M.R., 2010. Technical and economical assessment of the utilization of photovoltaic systems in residential buildings: The case of Jordan. *Energy Conversion and Management* 51, 1719–1726.
6. Rütther R., Braun P., 2009. Energetic contribution potential of building-integrated photovoltaics on airports in warm climates. *Solar Energy* 83, 1923–1931.
7. Mardaljevic J., Rylatt M., 2003. Irradiation mapping of complex urban environments: an image-based approach. *Energy and Buildings* 35, 27–35.
8. Compagnon R., 2004. Solar and daylight availability in the urban fabric. *Energy and Buildings* 36, 321–328.9.
9. Robinson D., Stone A., 2004. Solar radiation modelling in the urban context. *Solar Energy* 77, 295–309.
10. Robinson D., 2006. Urban morphology and indicators of radiation availability. *Solar Energy* 80, 1643-1648.
11. Castro M., Delgado A., Argul F., Colmenar A., Yves F., Peire J., 2005. Grid-connected PV buildings: analysis of future scenarios with an example of Southern Spain. *Solar Energy* 79, 86-95.
12. Sorensen B., 2001. GIS management of solar resource data. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 67 (1-4), 503-509.
13. Vardimon R., 2011. Assessment of the potential for distributed photovoltaic electricity production in Israel. *Renewable Energy* 36, 591-594.
14. Ordóñez J., Jadraque E., Alegre J., Martínez G., 2010. Analysis of the photovoltaic solar energy capacity of residential rooftops in Andalusia (Spain). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2122–2130.
15. Papadopoulos A.M., Karteris M.M., 2009. An assessment of the Greek incentives scheme for photovoltaics. *Energy Policy* 37, 1945–1952.
16. Campoccia A., Dusonchet L., Telaretti E., Zizzo G., 2009. Comparative analysis of different supporting measures for the production of electrical energy by solar PV and Wind systems: Four representative European cases. *Solar Energy* 83, 287–297.
17. Dusonchet L., Telaretti E., 2010. Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in western European Union countries. *Energy Policy* 38, 3297–3308.
18. Dusonchet L., Telaretti E., 2010. Economic analysis of different supporting policies for the production of electrical energy by solar photovoltaics in eastern European Union countries. *Energy Policy* 38, 4011–4020.