

IL FOTOVOLTAICO IN BREVE

A CURA DELL' ING. FULVIO SASSI

Milano – Prima ed. Agosto 2005

Revisione di Agosto 2010

Cos' è il fotovoltaico?

Il termine fotovoltaico si spiega (quasi) da solo: è composto dalla parola greca phos (=luce) e Volt (=unità di misura della tensione elettrica). Si tratta dunque della trasformazione di luce in energia elettrica.

La storia

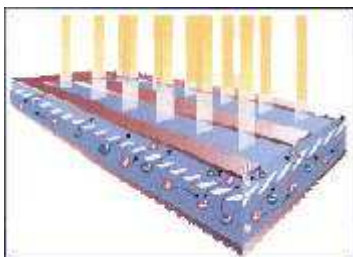


Sebbene l'effetto fotovoltaico venne scoperto già nel 1839, le prime applicazioni pratiche nacquero solo negli anni cinquanta. Il FV (fotovoltaico) venne sviluppato per i primi satelliti, che furono messi in orbita in quel periodo. Le tradizionali pile, batterie a combustione e l'energia nucleare non erano adatte alle esigenze di allora: dopo un breve periodo l'energia immagazzinata si sarebbe consumata ed il satellite sarebbe divenuto inutilizzabile.

Con lo sviluppo di celle solari al silicio ad alto rendimento, il FV si rivelò la soluzione ideale per questo impiego. I vantaggi erano evidenti:

- l'inesauribilità della fonte d'energia (il sole)
 - nessuna produzione di scorie (gas combustibili, residui, ecc.)
 - l'assoluta assenza di necessità di manutenzione dei componenti
- alta affidabilità grazie all'assenza di parti in movimento

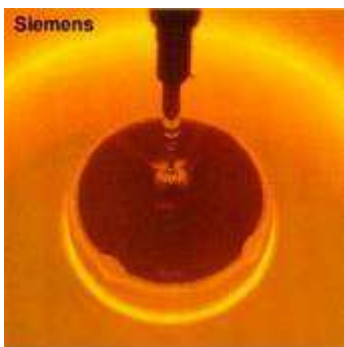
Il principio



Il funzionamento dei dispositivi fotovoltaici si basa sulla capacità di alcuni materiali semiconduttori, opportunamente trattati, di convertire l'energia della radiazione solare in energia elettrica in corrente continua senza bisogno di parti meccaniche in movimento. Il materiale semiconduttore quasi universalmente impiegato oggi a tale scopo è il silicio. Il componente base di un impianto FV è la cella fotovoltaica, che oggi è in grado di produrre circa 3,5 Watt di potenza in condizioni standard, vale a dire quando essa si trova ad una temperatura di 25 °C ed è sottoposta ad una potenza della radiazione pari a 1000 W/m². La potenza in uscita da un

dispositivo FV quando esso lavora in condizioni standard prende il nome di potenza di picco (Wp) ed è un valore che viene usato come riferimento. L'output elettrico reale in esercizio è in realtà minore del valore di picco a causa delle temperature più elevate e dei valori più bassi della radiazione. Più celle assemblate e collegate tra di loro in una unica struttura formano il modulo fotovoltaico.

La produzione di moduli solari



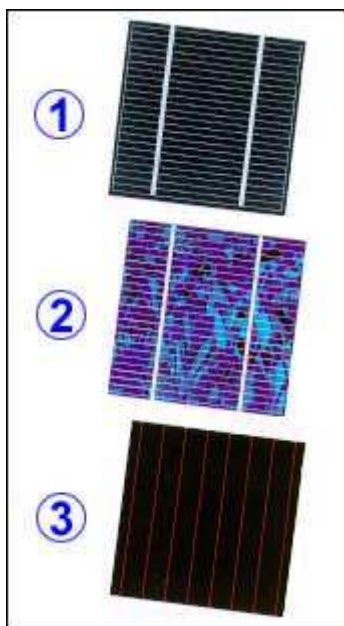
L'elemento principale delle celle FV è il silicio, che dopo l'ossigeno è l'elemento più frequente della crosta terrestre. In natura esso non compare in forma pura, ma sotto forma di composti insieme ad altri elementi. Per la produzione di celle FV però il silicio deve essere purissimo, ed è proprio la purificazione il processo più impegnativo e dispendioso. Dalle purissime barre di silicio vengono tagliati dei dischetti molto fini che vengono successivamente lisciiati mediante levigatura e trattamento con acido. Un altro metodo consiste nel ricoprire una piastra di vetro di atomi di silicio attraverso spruzzamento catodico (silicio amorfo).

Un ulteriore processo prende il nome di 'drogaggio'. Consiste nell'aggiunta programmata di impurità ai dischetti di silicio sotto forma di atomi estranei. Il dischetto così trattato può già essere chiamato cella FV, dato che in

questo stato possiede le proprietà di semiconduttore e in principio può già funzionare.

Per raggiungere la potenza desiderata e per proteggere le celle dai fattori atmosferici (vento, neve, pioggia/ghiaccio, ecc.), esse vengono collegate elettricamente, inserite in un telaio metallico e protette da una lastra di vetro.

I vari tipi di celle solari



A seconda dei loro processi di produzione, si distinguono i seguenti tipi di celle fotovoltaiche:

- **Celle monocristalline (1):** vengono prodotte tagliando una barra monocristallina. Il vantaggio principale è un alto rendimento (fino al 18%). Le celle di tipo monocristallino sono caratterizzate usualmente da un'omogenea colorazione blu.
- **Celle poli(multi-)cristalline (2):** vengono colate in blocchi e poi tagliate a dischetti. Il rendimento è leggermente inferiore (circa 16%), ma molto in linea con le mono. Questo tipo di celle è riconoscibile da un disegno ben distinguibile (a causa dei vari cristalli contenuti).
- **Celle amorphe (3):** vengono prodotte mediante spruzzamento catodico di atomi di silicio su una piastra di vetro. Questo tipo di cella ha il rendimento minore (ca. 4-10%), ma si adatta anche al caso di irradiazione diffusa (cielo coperto, ecc.). Le celle così prodotte sono riconoscibili da un caratteristico colore scuro, inoltre sono realizzabili in qualsiasi forma geometrica (forme circolari, ottagonali, irregolari, e persino convesse sono realizzabili).

Il Mercato ed il futuro del FV



Il mercato fotovoltaico mondiale ha conosciuto negli ultimi anni un enorme sviluppo. Questo grande risultato è stato possibile grazie al parallelo sviluppo di due tipologie di applicazioni: gli impianti isolati e quelli installati sugli edifici ed integrati alla rete elettrica. Gli incrementi più elevati nella potenza installata sono stati senza dubbio quelli della **Germania**, della **Spagna**, dell'**Italia**, del **Giappone**, degli **Stati Uniti**, soprattutto grazie ai **programmi di incentivazione da parte degli Stati** che, non solo hanno fornito sussidi per l'installazione di impianti FV, ma in alcuni casi (come in Germania, Spagna, Italia) hanno comprato l'elettricità in eccesso

prodotta da tali impianti e riversata in rete ad un prezzo molto maggiore di quello di vendita dell'elettricità tradizionale, come a voler "premiare" le caratteristiche ecologicamente compatibili di tale energia.

In Italia, dopo una fase di grande fermento della prima metà degli anni '90 in cui l'ENEL ha installato diverse centrali fotovoltaiche (la più grande delle quali la centrale di Serre nel Salernitano di 3,3 MWp), il mercato ha vissuto un forte rallentamento soprattutto per l'assenza di adeguati meccanismi di incentivazione. Nel 2001 è partito però Il Programma Tetti Fotovoltaici che ha dato al comparto fotovoltaico una certa accelerazione, ma solo oggi con il **CONTO ENERGIA, oggi alla sua TERZA versione**, si può continuare a prevedere un forte incremento del settore, dovuto al sistema di incentivazione (come in Germania) che posiziona l'investimento a **tassi di redditività maggiori** di strumenti finanziari classici (BOT, CCT, obbligazioni, etc...)

Il fotovoltaico è già oggi una fonte di energia con molti **vantaggi** in suo favore:

- Il sole è una fonte di energia gratuita e praticamente inesauribile
- non esistono limiti inferiori di grandezza per impianti FV. Non è invece realizzabile una centrale nucleare con una potenza di soli 3kW. Gli impianti FV sono realizzabili a partire da pochi mW (millesimi di Watt) fino a diversi MW (milioni di Watt).
- gli impianti possono essere ampliati a piacere; cioè la potenza di un impianto FV può essere aumentata anche successivamente senza grossi problemi (a condizione che sia stato progettato in modo professionale!)
- il prezzo d'acquisto che è ancora relativamente medio-alto, ma che beneficia di tutti i vantaggi del **CONTO ENERGIA**
- il fotovoltaico è particolarmente ecologico dato che non vengono prodotti gas di scarico o altre scorie
- elevata durata, quasi assenza di manutenzione, dato che non vi sono parti meccaniche in movimento, ma solo una pulizia annua
- per potenze ridotte è una fonte di energia estremamente mobile
- approvvigionamento energetico decentralizzato, cioè indipendenza da crisi energetiche

Gli argomenti a **sfavore** sono molti pochi:

- l'ingombro di un impianto FV è per lo meno uguale, se non minore a quello di altre forme di centrali elettriche a confronto. Inoltre un impianto fotovoltaico può essere montato su superfici come tetti, facciate, ecc.

I principi del fotovoltaico

L'irradiazione



Il sole emette continuamente un'inimmaginabile potenza di 175.000.000.000.000.000W (175 miliardi di megawatt), di cui ca. 1350W/m² raggiungono l'atmosfera terrestre. A causa della dispersione nell'atmosfera, la superficie terrestre viene raggiunta da ca. 1000W/m² (valori medi). Questo valore viene usato come riferimento di massima potenza di irradiazione per i calcoli ed è comunque raggiungibile solo in una giornata con cielo sereno.

I moduli solari però non riescono a trasformare tutta la energia di irradiazione in energia elettrica. I moduli attualmente sul mercato permettono, a seconda del tipo, di raggiungere dei rendimenti (rapporto tra energia irradiata e energia ricavata) dal 3% al 16%. Cioè da un impianto FV con una superficie di un metro quadrato possono essere ricavati teoricamente fino a 160Wp.

Potenzialità del fotovoltaico

La quantità di energia elettrica prodotta da un sistema fotovoltaico dipende da numerosi fattori:

- superficie dell'impianto
- posizione dei moduli FV nello spazio (angolo di inclinazione rispetto all'orizzontale = tilt ed angolo di orientamento rispetto al Sud = azimutale)
- valori della radiazione solare incidente nel sito di installazione
- efficienza dei moduli FV
- efficienza del BOS
- altri parametri (p.es. temperatura di funzionamento)

A titolo di esempio viene calcolata la quantità di energia elettrica mediamente prodotta dai sistemi fotovoltaici in un anno di funzionamento nei tre siti di Roma, Milano e Trapani. Ai fini del calcolo si può ragionare indifferentemente per m² di pannelli o per unità di potenza installata (ad es. 1 kWp). Si ipotizza che i pannelli FV siano inclinati di 30° sull'orizzontale ed orientati verso Sud. Per l'efficienza dei moduli si è preso un valore conservativo di 12,5% (i moduli possono avere efficienze anche fino al 16 - 17%), mentre per quella del BOS un valore dell'85% (include l'efficienza dell'inverter ed altri fattori di perdita, come ad esempio le perdite nei cavi elettrici di collegamento).

Calcolo dell'energia elettrica mediamente prodotta in corrente alternata in un anno da 1 m² di moduli:

Tabella.1	Insolazione media annua	X Efficienza moduli	X Efficienza del BOS	= Elettricità prodotta mediamente in un anno
MILANO	1372.4 kWh/m ² anno	12,5%	85%	145.8 kWhel/m ² anno
ROMA	1737.4 kWh/m ² anno	12,5%	85%	184.6 kWhel/m ² anno
TRAPANI	1963.7 kWh/m ² anno	12,5%	85%	208.6 kWhel/m ² anno

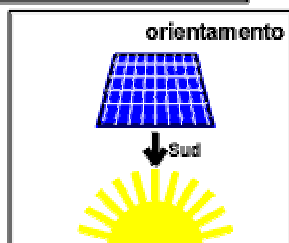
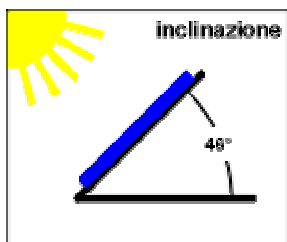
Calcolo dell'energia elettrica in corrente continua mediamente prodotta in un anno da 1 kWp di moduli:

Tabella.2	Insolazione media annua	X Efficienza moduli	X superficie occupata da 1 kWp di moduli	= Elettricità prodotta mediamente in un anno in corrente continua
MILANO	1372.4 kWh/m ² anno	12,5%	8 m ²	1372.4 kWhel/kWp anno
ROMA	1737.4 kWh/m ² anno	12,5%	8 m ²	1737.4 kWhel/kWp anno
TRAPANI	1963.7 kWh/m ² anno	12,5%	8 m ²	1963.7 kWhel/kWp anno

Calcolo dell'energia elettrica in corrente alternata mediamente prodotta in un anno da 1 kWp di moduli:

Tabella.3	Electricità prodotta mediamente in un anno in corrente continua	X efficienza del BOS	= Electricità prodotta mediamente in un anno in corrente alternata
MILANO	1372.4 kWhel/kWp anno	85%	1167 kWhel/kWp anno
ROMA	1737.4 kWhel/kWp anno	85%	1477 kWhel/kWp anno
TRAPANI	1963.7 kWhel/kWp anno	85%	1669 kWhel/kWp anno

Dati riportati dal Ministero dell'Ambiente



L'orientamento e l'inclinazione dei moduli

La posizione dei moduli fotovoltaici rispetto al sole influisce notevolmente sulla quantità di energia captata e quindi sulla quantità di energia elettrica generata. I parametri che direttamente influiscono sul fenomeno sono:

- angolo di inclinazione rispetto al terreno (angolo di tilt)
- angolo di azimut

La produzione di energia elettrica su base media annua nell'emisfero Nord è massima per l'esposizione Sud con angolo di inclinazione pari alla latitudine locale sottratta di 10° circa. Consideriamo l'influenza dell'angolo di inclinazione (tilt) sulla radiazione incidente di un sistema, rivolto a Sud, che si trovi a Milano, Roma oppure Trapani. Il valore della radiazione incidente è quello giornaliero medio annuo.

.	Milano (kWh/m ²)	Roma (kWh/m ²)	Trapani (kWh/m ²)
90° (facciata)	2.44	3.15	3.43
0° (tetto piano)	3.39	4.18	4.77
30° (tetto inclinato)	3.76	4.76	5.38

Rispetto pertanto alla soluzione ottimale con inclinazione di 30° il sistema fotovoltaico perde circa il 10-12% nell'applicazione su superficie orizzontale e ben il 35% nell'applicazione su facciata verticale. L'influenza dell'angolo di azimut è invece minore. In un intervallo di angoli di azimut compresi tra -45° e + 45° rispetto al Sud (angolo di azimut compreso tra sud-est e sud-ovest) i valori della radiazione incidente non si discostano significativamente dal valore massimo. Orientando infatti i sistemi fotovoltaici a Sud-Est oppure a Sud-Ovest si avrebbe una perdita pari a solo il 5%.



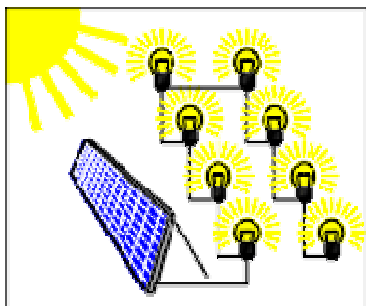
I tipi di impianti FV

Tutti gli impianti fotovoltaici sono classificabili nelle seguenti categorie:

- **Alimentazione diretta:** l'apparecchio da alimentare viene collegato direttamente al modulo FV. Il grande svantaggio di questo tipo di impianti è che l'apparecchio collegato non funziona in assenza di sole (di notte). **Applicazioni:** piccole utenze come radio, piccole pompe, calcolatrici tascabili, ecc.
- **Funzionamento ad isola:** il modulo FV alimenta uno o più apparecchi elettrici. L'energia fornita dal modulo, ma momentaneamente non utilizzata, viene usata per caricare degli accumulatori. Quando il fabbisogno aumenta, o quando il modulo FV non funziona (p.e. di notte), viene utilizzata l'energia immagazzinata negli accumulatori. **Applicazioni:** zone non raggiunte dalla rete di distribuzione elettrica
- **Funzionamento a immissione in rete:** il modulo solare alimenta le apparecchiature elettriche collegate. L'energia momentaneamente non utilizzata viene immessa nella rete pubblica. Il gestore di un impianto di questo tipo fornisce dunque l'energia eccedente a tutti gli

altri utenti collegati alla rete elettrica, come una normale centrale elettrica. Nelle ore serali e di notte la corrente elettrica può essere nuovamente prelevata dalla rete pubblica. **Applicazioni:** abitazioni, uffici, stabilimenti industriali, officine, banche, scuole, edifici pubblici, ecc.

Il dimensionamento di un impianto FV



Il dimensionamento ed i calcoli di un impianto fotovoltaico richiedono molto impegno. Entrano in gioco molteplici fattori, per esempio:

- Posizione geografica dell'impianto (latitudine)
 - Irradiamento solare (durata giornaliera, intensità)
 - temperatura ambientale media (anche la temperatura influenza il rendimento di un impianto)
 - superficie a disposizione. Se si dispone di uno spazio sufficientemente grande si possono impiegare dei moduli più convenienti a rendimento minore (che necessitano però di superfici maggiori).
- fabbisogno energetico degli apparecchi allacciati. È importante scegliere degli apparecchi a basso consumo energetico, come pompe e frigoriferi speciali, lampade a risparmio. Un fabbisogno energetico minore comporta un impianto FV più piccolo e quindi minor costo di acquisto.
 - Ciascuno dei tre tipi di impianti fotovoltaici ha esigenze diverse per quanto riguarda i moduli solari e l'elettronica.
 - Causa la complessità, la progettazione di un impianto FV deve essere eseguita da un esperto.

Di seguito un cenno particolare all'efficienza:

L'efficienza di trasformazione dell'energia solare in energia elettrica è data dal rapporto tra la potenza elettrica in uscita e la potenza della radiazione solare incidente. Ovviamente entrambe cambiano in funzione delle condizioni di irraggiamento solare. Come riferimento, si usano le condizioni standard di insolazione (potenza della radiazione incidente pari a 1000W/m², temperatura del modulo di 25 °C). Se si indicano con h l'efficienza, A l'area del modulo, P_{el} la potenza elettrica generata dal modulo FV e con P_{STC} la potenza luminosa irraggiante il modulo stesso in condizioni standard (STC) si può scrivere la relazione.

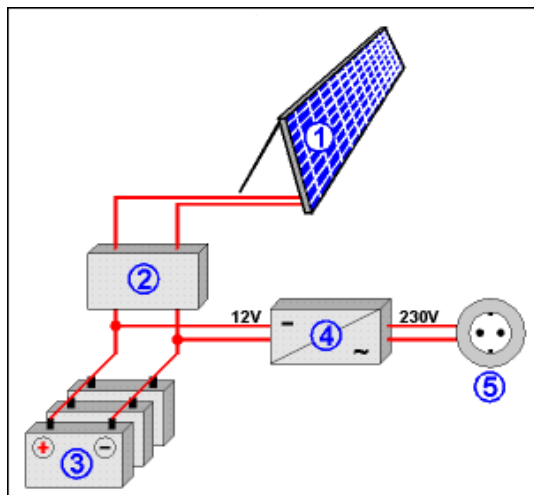
$$h_{STC} = P_{el} / P_{STC} * A$$

Ad esempio, un modulo con un'efficienza del 10% genera, in condizioni standard, una potenza elettrica (corrente continua) ai suoi morsetti di 100 Watt; 10 metri quadrati di moduli forniscono 1 kWp di potenza elettrica.

Un modulo con un'efficienza del 12,5 % genera in condizioni standard una potenza elettrica di 125 Watt. In questo caso per produrre 1 kWp sono necessari 8 metri quadrati di moduli.

L'efficienza d'impianto è inoltre influenzata in maniera consistente dai componenti elettrici necessari per il trasferimento dell'energia prodotta dal modulo fotovoltaico all'utenza. Si parla in termini tecnici di efficienza del BOS. Un valore dell'85% è generalmente considerato accettabile. Il dispositivo che causa la riduzione della potenza effettivamente utilizzabile all'utenza è l'inverter.

I componenti di un impianto fotovoltaico



Impianti ad isola

Gli impianti fotovoltaici ad isola funzionano, come fa intuire già il nome, indipendentemente dalla rete elettrica pubblica. Questo tipo di impianto viene dunque impiegato principalmente per l'alimentazione di apparecchi in zone isolate, o nel caso sia richiesta grande mobilità. Per poter disporre di energia elettrica anche durante le ore notturne l'energia fornita durante il giorno dai moduli FV viene immagazzinata da accumulatori.

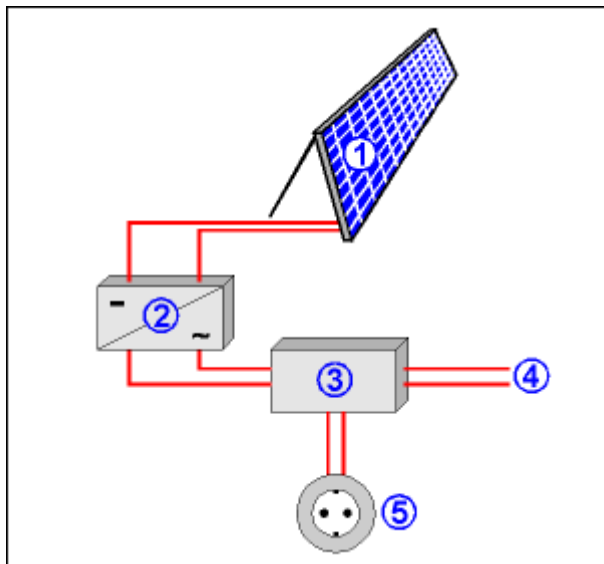
Un semplice impianto fotovoltaico ad isola è :

1. **Campo fotovoltaico:** per la trasformazione di energia solare in energia elettrica. Per ricavare più potenza vengono collegate tra loro diversi pannelli.
2. **Regolatore di carica:** è un apparecchio elettronico che regola la ricarica e la scarica degli accumulatori. Uno dei suoi compiti è di interrompere la ricarica ad accumulatore pieno.

3. **Accumulatori:** sono i magazzini di energia (batterie) di un impianto fotovoltaico. Essi forniscono l'energia elettrica quando i moduli non sono in grado di produrne, per mancanza di irradiazione solare.
4. **Invertitore:** trasforma la corrente continua proveniente dai moduli e/o dagli accumulatori in corrente alternata convenzionale a 230V. Se l'apparecchio da alimentare necessita di corrente continua si può fare a meno di questa componente.
5. **UtENZE:** apparecchi alimentati dall'impianto fotovoltaico.

Spesso vengono impiegati anche degli impianti composti. Per esempio impianti fotovoltaici in combinazione con gruppi elettrogeni a motore Diesel.

Impianti a immissione in rete



Gli impianti FV a immissione in rete possono essere definiti come centrali elettriche. Essi infatti forniscono l'energia solare trasformata direttamente alla rete pubblica di distribuzione dell'energia elettrica. Questi tipi di 'centrali', contrariamente ad altri tipi, sono già oggi realizzabili in forma ridotta (potenza di pochi watt) fino ai grandi impianti (potenza di diversi megawatt).

Un impianto FV a immissione in rete è principalmente composto dai seguenti componenti:

1. **Campo fotovoltaico:** per la trasformazione di energia solare in energia elettrica. Per ricavare più potenza vengono collegate tra loro diversi pannelli FV.
2. **Invertitore:** trasforma la corrente continua proveniente dai moduli in corrente alternata convenzionale a 230V di tensione. Questo adattatore è assolutamente necessario per il corretto funzionamento delle utenze collegate e per l'alimentazione della rete.
3. **Quadro elettrico:** in esso avviene la distribuzione dell'energia. In caso di consumi elevati o in assenza di alimentazione da parte dei moduli FV la corrente viene prelevata dalla rete pubblica (4). In caso contrario l'energia FV eccedente viene di nuovo immessa in rete. Inoltre esso misura la quantità di energia fornita dall'impianto fotovoltaico alla rete.
4. **Rete:** allacciamento alla rete pubblica dell'azienda elettrica.
5. **UtENZE:** apparecchi alimentati dall'impianto FV.

Vantaggi ambientali

I vantaggi dei sistemi fotovoltaici sono la modularità, le esigenze di manutenzione ridotte (dovute all'assenza di parti in movimento), la semplicità d'utilizzo, e, soprattutto, un **impatto ambientale estremamente basso**. In particolare, durante la fase di esercizio, l'unico vero impatto ambientale è rappresentato dall'occupazione di superficie. I benefici ambientali ottenibili dall'adozione di sistemi FV sono proporzionali alla quantità di energia prodotta, supponendo che questa vada a sostituire dell'energia altrimenti fornita da fonti convenzionali.

Per produrre un chilowattora elettrico vengono bruciati mediamente l'equivalente di 2,56 kWh sotto forma di combustibili fossili e di conseguenza emessi nell'aria circa 0,53 kg di anidride carbonica (fattore di emissione del mix elettrico italiano alla distribuzione). Si può dire quindi che ogni kWh prodotto dal sistema fotovoltaico evita l'emissione di 0,53 kg di anidride carbonica. Questo ragionamento può essere ripetuto per tutte le tipologie di inquinanti. Una quantificazione semplice per un **piccolissimo impianto** fotovoltaico da 1 kWp è la seguente:

Tabella 6.1	Energia elettrica generata in c.a. in un anno	X Fattore del mix elettrico italiano	Emissioni evitate in un anno	X Tempo di vita dell'impianto	Emissioni evitate nel tempo di vita
Milano	1167.4kWhel/kWp	0,531kg CO ₂ /kWhel	729kg CO ₂	30anni	18590 kg CO ₂
Roma	1477.4kWhel/kWp	0,531kg CO ₂ /kWhel	922kg CO ₂	30anni	23529 kg CO ₂
Trapani	1669.7kWhel/kWp	0,531kg CO ₂ /kWhel	1043kg CO ₂	30anni	26587 kg CO ₂