

Jose Perfetto

# PROGETTAZIONE DI IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

**FONTI RINNOVABILI NEGLI EDIFICI, RISPARMIO ENERGETICO  
E IL SISTEMA EDIFICIO-IMPIANTO**

- ENERGIA E CONTESTO ENERGETICO
- LA RADIAZIONE SOLARE
- TEORIA E TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA
- DISPOSITIVI E SISTEMI FOTOVOLTAICI
- INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DEL SOLARE FOTOVOLTAICO
- APPLICAZIONI SPECIALI E CRITERI DI ALLACCIO
- DIMENSIONAMENTO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI
- ASPETTI ECONOMICI DEL FOTOVOLTAICO



## SOFTWARE INCLUSO

FOGLI DI CALCOLO EXCEL PER OPERARE NELLA PROGETTAZIONE DI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

**Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento), **FAQ** (risposte alle domande più frequenti),  
**Test base / Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento)



**GRAFILL**

Jose Perfetto

## PROGETTAZIONE DI IMPIANTI SOLARI FOTOVOLTAICI

Ed. I (9-2018)

ISBN 13 978-88-8207-983-3

EAN 9 788882 079833

Collana **Manuali** (225)

Perfetto, Jose <1967->

Progettazione di impianti solari fotovoltaici / Jose Perfetto.

– Palermo : Grafill, 2018.

(Manuali ; 225)

ISBN 978-88-8207-983-3

1. Impianti solari.

621.31244 CDD-23

SBN Pal0305208

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Il volume è **disponibile anche in eBook** (formato \*.pdf) compatibile con **PC, Macintosh, Smartphone, Tablet, eReader.**

Per l'acquisto di eBook e software sono previsti pagamenti con c/c postale, bonifico bancario, carta di credito e PayPal.

Per i pagamenti con carta di credito e PayPal è consentito il download immediato del prodotto acquistato.

Per maggiori informazioni inquadra con uno Smartphone o un Tablet il Codice QR sottostante.



I lettori di Codice QR sono disponibili gratuitamente su Play Store, App Store e Market Place.

© **GRAFILL S.r.l.** Via Principe di Palagonia, 87/91 – 90145 Palermo

Telefono 091/6823069 – Fax 091/6823313

Internet <http://www.grafill.it> – E-Mail [grafill@grafill.it](mailto:grafill@grafill.it)

Finito di stampare nel mese di settembre 2018

presso **Andersen S.p.A.** Frazione Piano Rosa – 28010 Boca (NO)

**Disegno di copertina** / Elaborato con risorse Freepik ([it.freepik.com](http://it.freepik.com))

Tutti i diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica e di riproduzione sono riservati. Nessuna parte di questa pubblicazione può essere riprodotta in alcuna forma, compresi i microfilm e le copie fotostatiche, né memorizzata tramite alcun mezzo, senza il permesso scritto dell'Editore. Ogni riproduzione non autorizzata sarà perseguita a norma di legge. Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

## SOMMARIO

❏	<b>PREFAZIONE</b> .....	p.	9
<b>1.</b>	<b>ENERGIA E CONTESTO ENERGETICO</b> .....	"	11
1.1.	La domanda e le fonti di energia .....	"	11
1.2.	Le energie rinnovabili.....	"	23
1.2.1.	Definizione e classificazione.....	"	23
1.3.	I sistemi solari attivi e passivi.....	"	26
1.3.1.	Definizione dei sistemi solari.....	"	26
1.3.2.	I sistemi solari passivi.....	"	27
1.3.3.	I sistemi solari attivi.....	"	33
1.4.	Il solare fotovoltaico: cenni storici.....	"	35
<b>2.</b>	<b>LA RADIAZIONE SOLARE</b> .....	"	38
2.1.	Potenza e costante solare .....	"	38
2.2.	Irraggiamento extraterrestre.....	"	39
2.3.	Irraggiamento solare al suolo.....	"	40
2.4.	Diagramma delle traiettorie solari .....	"	45
2.4.1.	I diagrammi polari.....	"	45
2.4.2.	I diagrammi solari. Gli elementi principali.....	"	48
2.4.3.	Applicazione dei diagrammi polari.....	"	50
2.5.	Banche dati della radiazione solare: UNI 10349, ENEA e GIS.....	"	64
<b>3.</b>	<b>ASPETTI TEORICI DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA</b> .....	"	68
3.1.	Effetto fotovoltaico .....	"	68
3.2.	Caratteristiche della cella fotovoltaica.....	"	75
3.3.	Curva caratteristica e parametri di qualità di una cella.....	"	76
3.4.	Condizioni standard, STC ( <i>Standard Test Conditions</i> ).....	"	86
<b>4.</b>	<b>TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA</b> .....	"	91
4.1.	Cenni costruttivi della tecnologia .....	"	91
4.2.	Tipologia di cella in silicio monocristallino e policristallino .....	"	92
4.3.	Tipologia di cella a giunzione multipla, a film sottile e tecnologie innovative .....	"	93
4.4.	Tipologia costruttiva .....	"	96

4.5.	Curva caratteristica V-I di un modulo fotovoltaico e relativi parametri elettrici.....	p.	99
4.6.	Configurazione elettrica dei dispositivi .....	"	102
4.6.1.	Collegamenti in serie o in parallelo .....	"	102
4.7.	Parametri Elettrici di un modulo FV.....	"	103
4.7.1.	Diodi di by-pass ed effetto hot-spot.....	"	103
4.7.2.	Il fenomeno dell'hot-spot.....	"	104
4.8.	Il modulo fotovoltaico standard e vetro/vetro.....	"	105
<b>5.</b>	<b>TIPOLOGIE E APPLICAZIONI.....</b>	"	107
5.1.	Applicazioni della tecnologia fotovoltaica .....	"	107
5.2.	Impianti isolati dalla rete: componenti e criteri di dimensionamento, schemi di impianto .....	"	109
5.2.1.	Caratteristiche principali .....	"	109
5.2.2.	Il dimensionamento.....	"	110
5.2.3.	Esempi di cablaggio.....	"	115
5.2.4.	Approfondimento sulle batterie .....	"	117
5.2.5.	Tipologie di supporto .....	"	117
5.2.6.	Esempi di applicazione .....	"	119
5.2.7.	Manutenzione dei sistemi isolati.....	"	120
5.3.	Impianti collegati alla rete elettrica: componenti e criteri di dimensionamento, schemi di impianto .....	"	120
5.3.1.	Caratteristiche principali .....	"	120
5.3.2.	Dimensionamento della potenza di un impianto connesso in rete.....	"	121
5.3.3.	Dimensionamento della potenza per prevalente autoconsumo.....	"	123
5.3.4.	Il dimensionamento per area disponibile .....	"	125
5.3.5.	Schemi elettrici .....	"	126
<b>6.</b>	<b>IL GENERATORE FOTOVOLTAICO: I DISPOSITIVI.....</b>	"	128
6.1.	Opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici.....	"	128
6.2.	Quadro di parallelo, di campo e manovra.....	"	129
6.2.1.	Sequenza dei dispositivi.....	"	129
6.3.	Inverter.....	"	131
6.3.1.	I convertitori statici .....	"	131
6.3.2.	Le verifiche .....	"	139
6.4.	Quadro di interfaccia .....	"	140
6.5.	Protezioni.....	"	141
6.5.1.	Messa a terra del generatore fotovoltaico .....	"	142
6.5.2.	Scelta della tensione degli SPD lato corrente continua nei sistemi fotovoltaici.....	"	143
6.6.	Collegamento alla rete secondo la norma CEI 11-20 .....	"	145
6.6.1.	Il dispositivo generale (DG).....	"	146

6.6.2.	Il dispositivo di interfaccia (DDI).....	p.	146
6.6.3.	Il dispositivo di generatore (DDG) .....	"	146
6.6.4.	Il sistema di protezione di interfaccia (SPI).....	"	147
6.7.	Esempio di schema: impianto FV in parallelo alla rete elettrica di bassa tensione monofase e trifase .....	"	148
<b>7.</b>	<b>REALIZZAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI</b> .....	"	150
7.1.	Le modalità di conduzione di un sopralluogo e di collaudo .....	"	150
7.2.	Iter Autorizzativo .....	"	155
7.2.1.	Procedura autorizzativa semplificata .....	"	157
7.2.2.	Il Modello Unico.....	"	157
7.3.	Vincoli paesaggistici, storici, architettonici.....	"	158
7.3.1.	Paesaggistica .....	"	161
7.4.	Componenti e modalità di montaggio.....	"	164
7.5.	Gestione del cantiere e sicurezza .....	"	165
7.5.1.	Fondamenti di sicurezza D.Lgs. n. 81/2008.....	"	166
7.6.	Il collaudo .....	"	169
7.7.	La manutenzione di un sistema solare fotovoltaico.....	"	172
<b>8.</b>	<b>INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DEL SOLARE FOTOVOLTAICO</b> .....	"	178
8.1.	Le strutture di supporto.....	"	178
8.2.	Il sistema ad inseguimento.....	"	178
8.3.	Sistemi di integrazione del fotovoltaico su coperture, inclinate, piane, a risega, curve, facciate, frangisole, pensiline o tettoie.....	"	183
8.3.1.	I sistemi integrati.....	"	197
8.3.2.	La tegola fotovoltaica.....	"	200
8.3.3.	I laminati fotovoltaici.....	"	202
8.3.4.	Moduli fotovoltaici in sostituzione di superfici trasparenti degli edifici .....	"	202
8.3.5.	Sistemi integrati a frangisole.....	"	204
8.3.6.	Sistemi fotovoltaici integrati in facciata .....	"	205
8.4.	Sistemi fotovoltaici di grandi dimensioni.....	"	209
8.4.1.	Impianti fotovoltaici a terra: sistemi ad infissione diretta .....	"	210
8.4.2.	Strutture a basamento.....	"	213
<b>9.</b>	<b>CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI</b> .....	"	214
9.1.	Criteri di dimensionamento per area, esposizione, consumi e riqualificazione energetica .....	"	214
9.1.1.	Dimensionamento per area.....	"	214
9.1.2.	Dimensionamento per consumi.....	"	216
9.2.	Parametri di targa e configurazione moduli/inverter .....	"	217

9.2.1.	Riepilogo .....	p.	231
9.3.	Layout di impianto .....	"	232
9.4.	Configurazione e calcolo di un impianto da 3 kWp .....	"	240
9.4.1.	Selezione dei moduli .....	"	240
9.4.2.	Scelta dell'inverter .....	"	241
9.4.3.	Scelta dei cavi .....	"	242
9.4.4.	Verifica caduta di tensione .....	"	243
9.4.5.	Dispositivi di manovra e protezione .....	"	244
9.5.	Configurazione di un Impianto da 60 kWp .....	"	245
9.5.1.	Scelta inverter .....	"	247
9.5.2.	Scelta dei cavi .....	"	247
9.5.3.	Verifica caduta di tensione .....	"	249
9.5.4.	Quadro di parallelo inverter .....	"	250
9.5.5.	Quadro generale .....	"	251
9.6.	Configuratori per gli impianti fotovoltaici .....	"	252
9.6.1.	Configurazione elettrica di impianto fotovoltaico collegato alla rete elettrica di distribuzione da 20 kWp .....	"	254
<b>10.</b>	<b>APPLICAZIONI SPECIALI E CRITERI DI ALLACCIO .....</b>	"	259
10.1.	Smart Grid e CEI 0-21 .....	"	259
10.2.	Sistemi FV <i>Grid Connected</i> e <i>Storage</i> .....	"	266
10.3.	Simulazione del bilancio energetico .....	"	274
10.4.	Scelta del sistema di accumulo .....	"	276
10.4.1.	Dimensionamento .....	"	276
10.4.2.	Dimensionamento in sintesi .....	"	280
10.5.	Tipologie impiantistiche ammesse .....	"	282
10.5.1.	I sistemi più diffusi oggi in commercio .....	"	284
10.5.2.	I sistemi <i>on grid</i> post-produzione .....	"	284
10.5.3.	I sistemi <i>off grid</i> .....	"	285
10.6.	Le procedure necessarie .....	"	288
10.7.	Normativa di riferimento .....	"	296
<b>11.</b>	<b>GLI ASPETTI ECONOMICI DEL FOTOVOLTAICO .....</b>	"	297
11.1.	Il mercato mondiale del fotovoltaico .....	"	297
11.2.	Costo e vita dell'investimento .....	"	301
11.3.	Il <i>Business Plan</i> .....	"	310
11.4.	Simulazione di una valutazione finanziaria .....	"	314
11.4.1.	Simulazione del Business Plan .....	"	314
11.4.2.	Fotovoltaico e valutazioni finanziarie .....	"	320
11.4.3.	Conclusioni .....	"	320
11.5.	Altre forme di valorizzazione dell'energia da FV .....	"	320
11.5.1.	La <i>grid parity</i> .....	"	320
11.6.	Aspetti fiscali .....	"	323
11.6.1.	Detrazioni fiscali .....	"	323

<b>12. CASI STUDIO</b> .....	p.	326
<b>12.1.</b> Impianto da 4,5 kWp a servizio di una utenza privata.....	"	326
<b>12.1.1.</b> Composizione del sistema fotovoltaico .....	"	327
<b>12.1.2.</b> Cenni sul progetto esecutivo .....	"	327
<b>12.1.3.</b> Strutture di supporto.....	"	329
<b>12.1.4.</b> La fase realizzativa.....	"	330
<b>12.1.5.</b> Collaudi finali.....	"	331
<b>12.2.</b> Impianto da 20 kWp a servizio di una scuola.....	"	332
<b>12.2.1.</b> Descrizione dell'impianto fotovoltaico.....	"	333
<b>12.3.</b> Impianto da 100 kWp a servizio di un'azienda .....	"	339
<b>12.3.1.</b> Descrizione degli impianti .....	"	340
<b>12.3.2.</b> Produzione energetica stimata.....	"	341
<b>12.3.3.</b> La fase realizzativa.....	"	344
<b>12.3.4.</b> Collaudi finali.....	"	346
<b>12.4.</b> Impianto da 1 MWp a terra.....	"	348
<b>12.4.1.</b> Progettazione ed autorizzazioni .....	"	353
<b>12.4.2.</b> Valutazione finanziaria .....	"	356
<b>12.4.3.</b> Strutture di supporto moduli .....	"	357
<b>12.4.4.</b> La fase realizzativa.....	"	357
<b>12.4.5.</b> Quadri ed organizzazione lato corrente continua.....	"	362
<b>▾ BIBLIOGRAFIA</b> .....	"	364
<b>▾ INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO</b> .....	"	365
– Note sul software incluso .....	"	365
– Requisiti hardware e software .....	"	365
– Download del software e richiesta della password di attivazione .....	"	365
– Installazione ed attivazione del software.....	"	366



## PREFAZIONE

La trasformazione del settore energetico, responsabile di almeno i due terzi delle emissioni di gas a effetto serra, è indispensabile per raggiungere gli obiettivi previsti dall'Accordo di Parigi e in linea generale previsti dalle politiche dei principali paesi industrializzati. I cambiamenti già in atto nel settore energetico, evidenziando le prospettive e il potenziale dell'energia a basse emissioni di gas serra, conferiscono credibilità all'implementazione di azioni efficaci contro il cambiamento climatico. Nel 2015, le emissioni di CO<sub>2</sub> correlate all'energia sono rimaste stabili. Questo risultato è principalmente imputabile alla riduzione dell'1,8% dell'intensità energetica dell'economia globale, una dinamica rafforzata dall'incremento dell'efficienza energetica e dal più diffuso utilizzo su scala mondiale delle fonti di energia più pulite, principalmente rinnovabili. Una quota crescente dei circa 1.800 miliardi di dollari investiti ogni anno nel settore energetico è stata assorbita da investimenti in energia pulita; al contempo, gli investimenti nello sviluppo *upstream* di petrolio e gas hanno registrato un forte calo.

Nel 2015, l'ammontare dei sussidi al consumo di combustibili fossili è sceso a 325 miliardi di dollari rispetto ai circa 500 miliardi dell'anno precedente, una diminuzione che riflette sia il calo dei prezzi delle fonti fossili sia il processo di riforma dei sussidi stessi che ha subito un'accelerazione in diversi paesi.

Il cambiamento climatico è una realtà e l'uso di energia per le attività umane ne è largamente responsabile. Le città e l'ambiente costruito in generale sono quindi tra le principali cause del cambiamento climatico in quanto gli enormi consumi energetici e il traffico contribuiscono in modo sostanziale all'aumento dei gas a effetto serra.

È quindi necessario che, oltre che i Governi di tutti gli Stati, anche le Amministrazioni Locali si facciano carico delle loro responsabilità e attuino le azioni necessarie di loro competenza relative alle politiche di riduzione dei gas serra tra cui il risparmio e l'efficienza energetica attraverso anche l'incentivazione delle fonti di energia rinnovabili. Infatti, le FER possono ricoprire un ruolo significativo sia a livello energetico, sia a livello ambientale, sia a livello socio-economico.

La Commissione Europea per coinvolgere attivamente le città europee nel raggiungimento degli obiettivi di sostenibilità energetica e ambientale del 2020, nell'ambito della 2<sup>a</sup> edizione della *Settimana europea dell'energia sostenibile* (EUSEW 2008) ha lanciato il Patto dei Sindaci (*Covenant of Mayors*) iniziativa, su base volontaria, che impegna le città a predisporre un Piano di Azione vincolante con l'obiettivo di ridurre di oltre il 20% le proprie emissioni di gas serra attraverso soprattutto politiche e misure locali che aumentino il ricorso alle fonti di energia rinnovabile. Ad oggi 73 città europee hanno firmato l'accordo mentre 121 hanno ufficialmente manifestato interesse ad aderire.

In Italia, per il raggiungimento degli obiettivi europei del 2020, il Governo ha concordato con la Commissione Europea su tre obiettivi: innovazione tecnologica, miglioramento indipendenza energetica dai paesi terzi, riduzione delle emissioni, pone in primo piano l'incremento delle FER.

Premesso questo l'intento di questa guida è quello di contribuire in modo significativo alla cultura dell'innovazione tecnologica attribuendo ai progettisti il difficile e importante ruolo di portatori di conoscenza e adeguamento alle pressanti richieste del mercato in termini di professionalità ed innovazione nel campo dell'ambiente costruito in generale e dell'impiantistica in particolare.

## ENERGIA E CONTESTO ENERGETICO

L'energia è la possibilità di svolgere compiti, azioni, in fisica si dice *compiere un lavoro*.

Per inquadrare il tema relativo ai sistemi solari è necessario comprendere il contesto nel quale si colloca il tema delle energie rinnovabili; risulta quindi necessario affrontare il tema dell'energia inteso come panorama energetico ed a più largo raggio le fonti di energia, i settori più energivori, l'inquinamento e l'emissione di CO<sub>2</sub> legata alla produzione dell'energia, il concetto di *energia primaria*, le riserve, la produzione, il consumo o fabbisogno, le fonti fossili e quelle rinnovabili.

Essendo l'energia solare la fonte rinnovabile per eccellenza occorre distinguere tra i Sistemi Solari Attivi e Passivi per comprenderne le caratteristiche e le applicazioni.

Giungeremo quindi ad inquadrare il solare fotovoltaico attraverso brevi cenni storici per apprezzarne la peculiarità e l'evoluzione tecnologica.

### 1.1. La domanda e le fonti di energia

L'attuale contesto internazionale è difficile e incerto. L'economia globale è rimasta a lungo in fase di rallentamento e prevedere l'evoluzione dello scenario energetico futuro è un esercizio complesso.

Con queste premesse, si prevede che lo scenario globale nei prossimi 20-25 anni sia caratterizzato dalle seguenti tendenze:

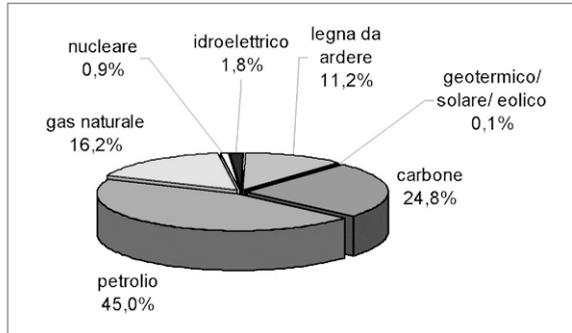
- la domanda di energia nel mondo è prevista in crescita (+50% al 2035), ma con un andamento fortemente differenziato tra diverse aree geografiche: molto bassa nei Paesi industrializzati ed in forte aumento in quelli in via di sviluppo (+85%);
- aumenta l'efficienza Energetica grazie anche all'avanzare tecnologico nel campo illuminotecnico e nella climatizzazione;
- tra le fonti di energia, il gas e le rinnovabili sono sempre più in espansione, a scapito soprattutto del petrolio, che perderà quote importanti, mentre carbone e nucleare manterranno sostanzialmente la loro quota di mercato attuale.

Tutti i settori di attività umana prevedono da sempre un consumo energetico; i settori più energivori, che necessitano cioè di grandi quantitativi di energia, sono il settore industriale, agricolo, quello dei trasporti e delle costruzioni.

Se abbiniamo ai settori energivori la disponibilità di fonti energetiche non possiamo non ricordare uno dei periodi più critici per quel che riguarda l'approvvigionamento energetico ovvero il 1973, anno nel quale i principali paesi produttori di petrolio (l'OPEC) decisero di sospendere improvvisamente le forniture di greggio agli Stati occidentali che avevano appoggiato Israele nella guerra del Kippur. La ritorsione dell'OPEC si tradusse in un aumento improvviso e molto elevato del prezzo del petrolio, che nel giro di poco tempo crebbe di oltre tre volte.

Al 1973 la ripartizione dei consumi energetici mondiali vedeva l'88% di utilizzo delle cosiddette *fonti fossili* come il petrolio, carbone, gas naturale e nucleare mentre il restante 12% di utilizzo di altre fonti come la biomassa (ovvero la legna come combustibile) e l'idroelettrico.

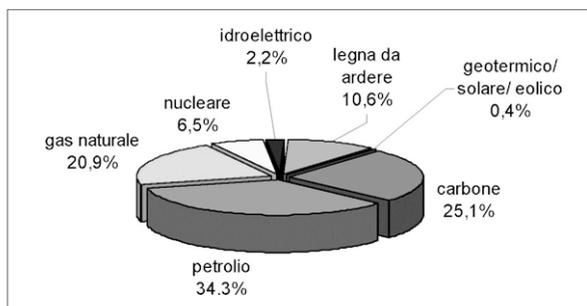
Il grafico di **figura 1.1** mostra i consumi energetici mondiali, per fonte, nel 1973 secondo l'*International Energy Agency* (IEA).



**Figura 1.1.** *Consumi energetici mondiali, per fonte, nel 1973*  
(Fonte: *International Energy Agency*)

Il trentennio successivo alla prima crisi energetica del '73 ha visto un costante incremento del consumo di Gas naturale il cui approvvigionamento avviene anche da altri paesi oltre che quelli del Medio Oriente; il nucleare ha visto un forte incremento proprio per la produzione di energia elettrica mentre il consumo di carbone è rimasto pressoché invariato.

Al 2004 il consumo mondiale medio totale dell'umanità era stimato pari a 15 TW e per più dell'85% proveniva dai combustibili fossili come petrolio, gas naturale, carbone e nucleare.



**Figura 1.2.** *Consumi energetici mondiali, per fonte, nel 2004*  
(Fonte: *International Energy Agency*)

La combustione di carbone, metano o petrolio fornisce la gran parte della quantità di energia impiegata in parte per i sistemi di riscaldamento a combustione ed in parte per il funzionamento di motori o per la produzione di energia elettrica che è un tipo di energia che può essere trasferita a grandi distanze.

## LA RADIAZIONE SOLARE

### 2.1. Potenza e costante solare

Il Sole è la stella madre del sistema solare attorno alla quale orbitano gli otto pianeti principali (tra cui la Terra), i pianeti nani, i loro satelliti, innumerevoli altri corpi minori e la polvere diffusa per lo spazio, che forma il mezzo interplanetario.

La massa del Sole rappresenta da sola il 99,9% della massa complessiva del sistema solare.

Il Sole è la principale fonte di energia disponibile sulla Terra ed è costituito per l'80% da idrogeno e dal 19% da elio; nel restante 1% sono stati rinvenuti quasi tutti gli elementi conosciuti.

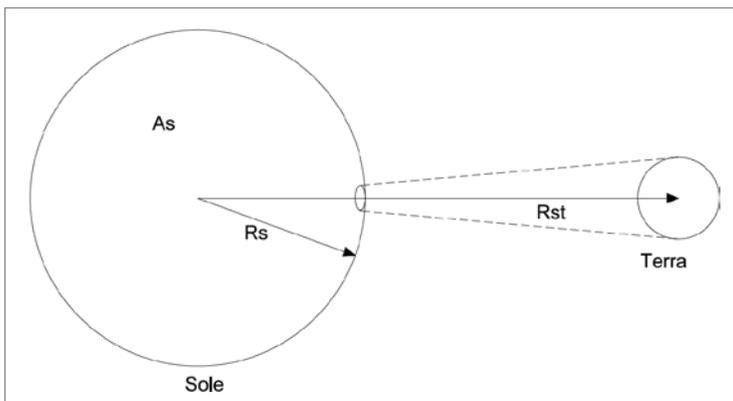
L'energia irradiata dal Sole deriva da una reazione di tipo term nucleare che converte continuamente massa in energia.

La fusione nucleare consiste nella trasformazione di quattro nuclei di idrogeno in un nucleo di elio. Essendo la massa del nucleo di elio minore della somma delle masse dei quattro nuclei di idrogeno, la loro differenza viene trasformata in energia con la famosa relazione:

$$E = mc^2$$

(Energia uguale massa per velocità della luce al quadrato)

La potenza associata alla radiazione solare emessa dai processi di fusione che incide sull'unità di superficie prende il nome di *irraggiamento solare*.



**Figura 2.1.** Potenza ed emissione per unità di superficie

In termini di calcolo, conoscendo la massa dell'idrogeno, la massa dell'elio, la quantità delle reazioni, la velocità luce, il raggio del Sole quindi la sua superficie, la distanza minima e massima tra la Terra e il Sole, in quanto l'orbita è ellittica, siamo in grado di calcolare la quantità

di energia irradiata verso la Terra. Ciò risulta possibile applicando le equazioni di riduzione di massa dovuta alle reazioni ovvero la trasformazione in energia secondo la relazione di Einstein, calcolando la superficie solare e la potenza di emissione per unità di superficie. In numeri:

- Massa idrogeno ( $1.67356 \cdot 10^{-27}$  kg);
- Massa elio ( $6.64658 \cdot 10^{-27}$  kg);
- Velocità luce ( $2.99792458 \cdot 10^8$  m/s);
- Raggio del Sole ( $6.9626 \cdot 10^5$  km);
- Distanza Terra-Sole min ( $1.471 \cdot 10^8$  km);
- Distanza Terra-Sole max ( $1.521 \cdot 10^8$  km).

## 2.2. Irraggiamento extraterrestre

La potenza irradiata complessivamente dal Sole è pari ad oltre 60.000 kW/m<sup>2</sup>.

La potenza disponibile decresce via via che aumenta la distanza dal Sole, e dopo aver percorso i circa 150 milioni di km che separano la Terra dal Sole assume un valore molto più ridotto, di poco superiore ad 1.35 kW/m<sup>2</sup>. Tale valore viene chiamato *costante solare*.

Nella realtà tale valore non è costante perché dipende dall'attività solare (macchie solari) e dalla distanza Sole-Terra variabile nell'arco dell'anno. Il valore medio è di 1.353 W/m<sup>2</sup>.

La costante solare è da intendersi come un valore medio di riferimento in quanto la potenza che raggiunge la fascia esterna della atmosfera terrestre in realtà oscilla a causa dell'orbita ellittica Terra-Sole.

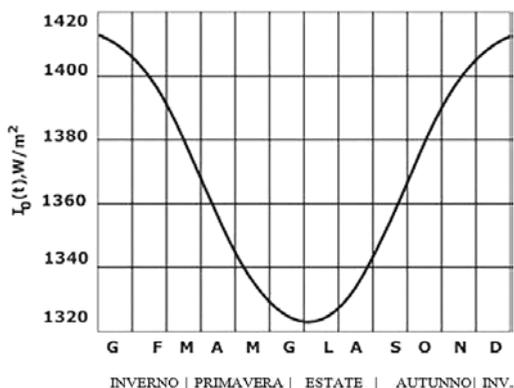


Figura 2.2. Valore della Costante Solare

La costante solare è la somma delle energie di tutte le frequenze dello spettro della radiazione solare, non soltanto quelle della banda visibile.

Per l'intero globo terrestre, che ha una sezione di taglio di 127.400.000 km<sup>2</sup>, la potenza fornita dall'energia solare è di  $1,74 \times 10^{17}$  W, con una variazione del  $\pm 3,5\%$ .

Di conseguenza, tenuto conto della superficie sferica del nostro pianeta, la potenza solare che viene indirizzata sulla Terra ha un valore di circa  $174 \times 10^{15}$  W, ossia di 174 PetaWatt (PW) pari a 174 milioni di GW.

In altri termini, l'energia luminosa arriva sulla Terra al ritmo di 174 milioni di GW.

## ASPETTI TEORICI DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

### 3.1. Effetto fotovoltaico

Un impianto fotovoltaico trasforma direttamente ed istantaneamente l'energia solare in energia elettrica; questa tecnologia funziona mediante l'effetto fotoelettrico, per mezzo del quale materiali semiconduttori opportunamente drogati generano elettricità se esposti alla radiazione solare. Si definisce quindi sistema fotovoltaico «l'insieme dei componenti meccanici, elettrici, ed elettronici che concorrono a captare e trasformare l'energia solare disponibile, rendendola utilizzabile dall'utenza sotto forma di Energia elettrica».

Il solo insieme dei moduli fotovoltaici, pur costituendo l'elemento principale del sistema al centro del processo produttivo, non è sufficiente per la realizzazione di un impianto in grado di approvvigionare gli utenti dell'energia richiesta; il sistema nel suo complesso è quindi più esteso e comprende l'utilizzo di altri dispositivi che permettono nel loro complesso la trasformazione, gestione, monitoraggio e trasmissione dell'energia prodotta in condizioni di sicurezza per l'utente, l'installatore e il gestore.

Il tutto inizia comunque da un *principio fotovoltaico* che permette di innescare la generazione di energia elettrica.

Il principio fotovoltaico consente di convertire la radiazione solare incidente in corrente elettrica continua utilizzando materiali semiconduttori, propri dell'industria elettronica, facendo interagire il fotone della radiazione solare con gli elettroni del materiale. Tale effetto viene innescato da una sottile fetta di materiale semiconduttore opportunamente trattato. Tale trattamento è caratterizzato da diversi processi chimici, tra i quali si hanno i cosiddetti *drogaggi*.

Inserendo nella struttura cristallina ad esempio del silicio delle impurità, cioè atomi di boro e fosforo, si genera un campo elettrico e si rendono anche disponibili le cariche necessarie alla formazione della corrente elettrica.

Il fotone risulta quindi una particella associata alle onde elettromagnetiche capace di fornire l'energia necessaria ad attivare il processo.

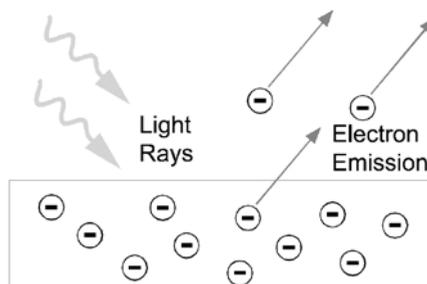


Figura 3.1. Schema del principio fotovoltaico

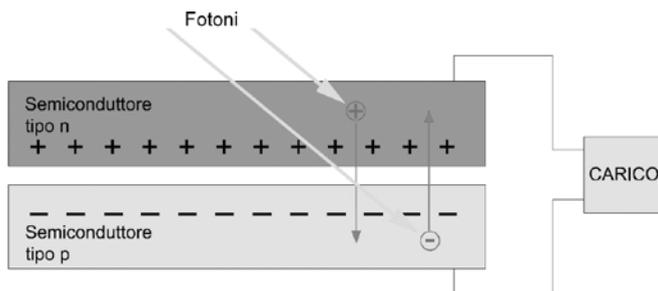


Figura 3.2. Le giunzioni di tipo «P» ed «N»

L'elemento certo è che questo processo è possibile grazie alle proprietà di alcuni materiali detti semiconduttori:

Si tratta di sostanze cristalline, organiche o inorganiche, con resistività intermedia tra quella dei conduttori e degli isolanti.

La conversione fotovoltaica avviene sfruttando le cosiddette giunzioni *p-n*, le quali sono alla base di gran parte della strumentazione elettronica (il che ha permesso di facilitare lo sviluppo della tecnologia solare sfruttando le conoscenze in precedenza acquisite, e le stesse fonti di materia prima cui attinge l'elettronica).

I semiconduttori, come per esempio il silicio (*Si*, numero atomico 14) sono organizzati in reticoli cristallini. Ogni atomo è circondato da altri 4, dove ognuno mette in comune uno dei suoi 4 elettroni di valenza per raggiungere la configurazione stabile ed avere l'ottetto esterno completo; in questo modo il silicio mantiene uno stato elettricamente neutro, poiché il numero dei protoni ed elettroni è il medesimo.

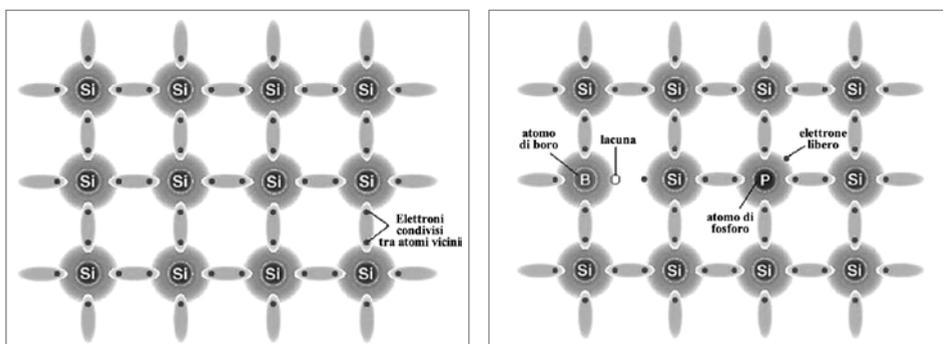


Figura 3.3. I reticoli cristallini

Esiste quindi un forte legame elettrostatico fra un elettrone e i due atomi che esso contribuisce a tenere uniti. Questo legame può essere spezzato con una certa quantità di energia che permette di passare ad un livello energetico superiore.

È quello che avviene quando i fotoni dotati di energia sufficiente innescano la migrazione di elettroni dalla zona *P* alla zona *N*.

## TECNOLOGIA DELLA CONVERSIONE FOTOVOLTAICA

### 4.1. Cenni costruttivi della tecnologia

Per diventare un prodotto utilizzabile le celle fotovoltaiche sono cablate elettricamente ed incapsulate in un insieme di layer volto a creare un modulo.

Il modulo fotovoltaico è l'elemento modulare alla base del generatore fotovoltaico ed è il dispositivo nel quale vengono organizzate le celle fotovoltaiche. La singola cella può produrre una potenza da 3 a 6 watt che risulta insufficiente per applicazioni pratiche.

Per accrescere la potenza, più celle sono collegate tra di loro in maniera da costituire un generatore la cui potenza può arrivare oltre i 350 watt.

Per ottenere i moduli fotovoltaici, le celle vengono collegate in serie e saldate tra loro mediante terminali sui **contatti anteriori e posteriori** (in sequenza Negativo/Positivo/Negativo/Positivo...) in modo da formare le **stringhe**.



**Figura 4.1.** Fase di lavorazione di un modulo fotovoltaico (Saint Gobain)

I moduli fotovoltaici cristallini oggi più comuni sono costituiti da 48, 60 o 72 celle con una configurazione elettrica utile a conseguire valori di tensione e corrente per l'accoppiamento con altri dispositivi come ad esempio convertitori o accumulatori elettrochimici.

Nell'esempio seguente viene riprodotto un modulo fotovoltaico costituito complessivamente da 72 celle organizzate in serie con una tensione di 40 V e una corrente di 4 A.

La connessione in serie consente di sommare la tensione di ogni cella mentre la corrente rimarrà la corrente tipica della singola cella.

Otterremo così un generatore in corrente continua dotato dei due poli: il polo positivo e quello negativo.

In **figura 4.2** si nota la presenza di 3 diodi, ovvero dispositivi semiconduttori, che fungono da by-pass per la limitazione di perdite per ombreggiamenti di cui parleremo in seguito.

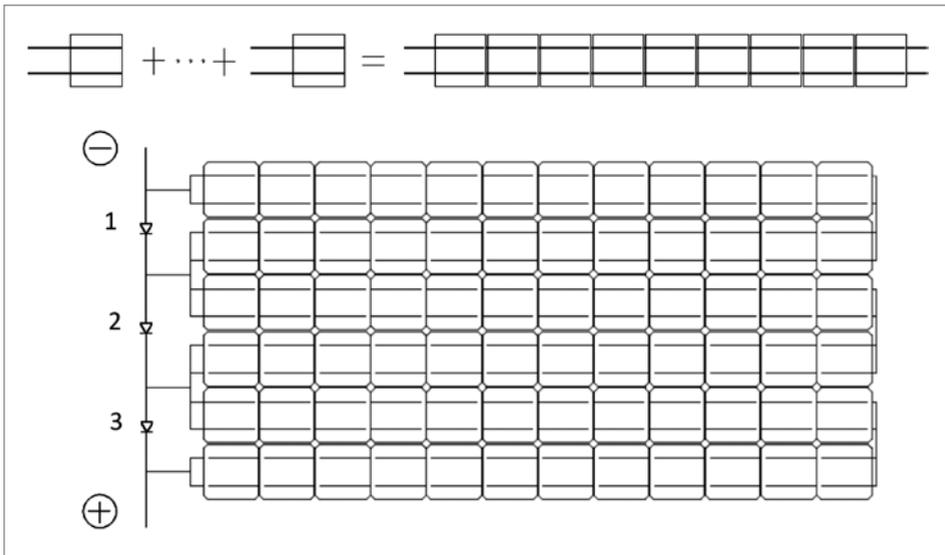


Figura 4.2. Organizzazione delle celle cristalline di un modulo fotovoltaico

#### 4.2. Tipologia di cella in silicio monocristallino e policristallino

Esistono attualmente tre generazioni di tecnologie fotovoltaiche. La prima, la tecnologia cristallina, è quella attualmente più utilizzata e viene denominata del tipo mono e policristallino.

Le differenze maggiori si hanno nella formazione della fetta di silicio, denominata *wafer*, che è la struttura principale sulla quale verranno eseguiti i diversi trattamenti di natura chimica che portano alla creazione della vera e propria cella.

Il *wafer* di monocristallo si produce con il metodo Czochralsky, basato sulla cristallizzazione che si origina immergendo un seme di materiale molto puro nel silicio liquido; viene poi estratto e raffreddato per ottenere un lingotto di monocristallo di forma cilindrica.

Il lingotto verrà drogato e poi affettato in *wafer* aventi uno spessore compreso tra i 250 e i 350 micrometri.

Le celle in silicio poli-cristallino sono di solito quadrate perché ricavate da semplici lingotti di diversi cristalli.

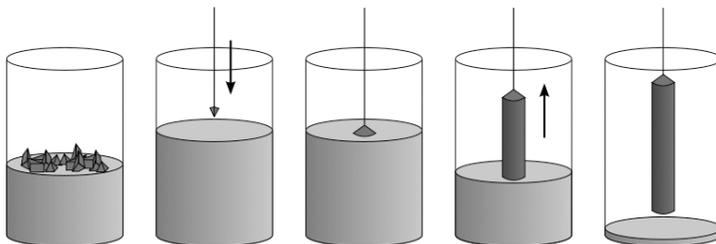


Figura 4.3. Il metodo Czochralsky

## TIPOLOGIE E APPLICAZIONI

### 5.1. Applicazioni della tecnologia fotovoltaica

Ad oggi le applicazioni fotovoltaiche ricoprono la quasi totalità del mondo energetico.

Abbiamo visto che la generazione con celle anche di piccolissime dimensioni può rendere autosufficiente dispositivi quali calcolatrici ed orologi che necessitano di qualche centesimo di Watt per il loro funzionamento.

Sistemi isolati dalla rete elettrica e quindi ad alto onere di allaccio come ripetitori, segnaletica e stazioni di monitoraggio, che necessitano di qualche decina di Watt sono già da tempo applicazioni affidabili ed economicamente vantaggiose oltre a quelle per i paesi in via di sviluppo.

Le applicazioni che riguardano potenze dal kiloWatt in su sono invece quelle interessate principalmente dalla cosiddetta *generazione diffusa* ovvero delle vere e proprie piccole centrali fotovoltaiche che costituiscono una micro-generazione sul territorio di alimentazione della rete.

Generalmente questi impianti connessi in rete sono anche integrati architettonicamente nell'involucro degli edifici o in elementi di arredo urbano.

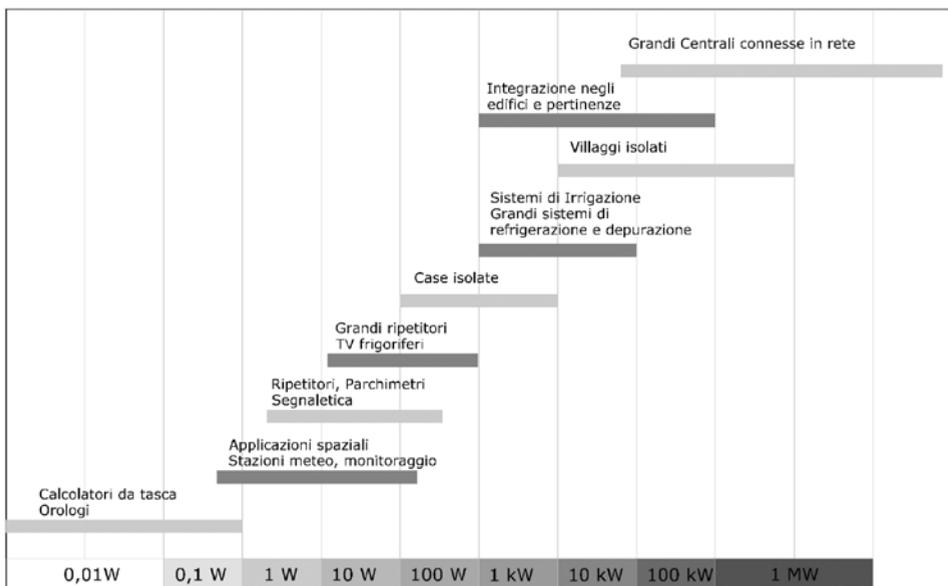
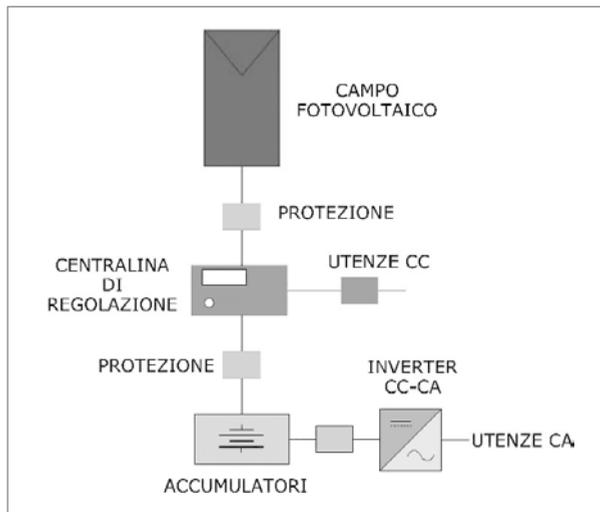


Figura 5.1. Applicazioni fotovoltaiche

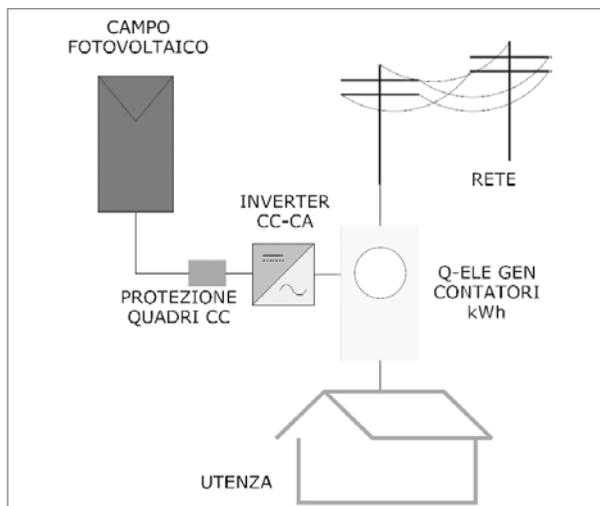
Esistono quindi fondamentalmente due tipologie di sistemi fotovoltaici ovvero i **sistemi isolati** e quelli **connessi in rete** la cui architettura è sostanzialmente diversa.

Nei primi il campo fotovoltaico, l'insieme dei moduli, alimenta direttamente utenze o carichi in corrente continua oppure accumulatori elettrochimici, le cosiddette batterie, che poi renderanno disponibile l'energia collezionata in tempi diversi dalla generazione; queste tipologie impiantistiche prevedono l'eventuale inserimento di un inverter, un convertitore di energia da corrente continua ad alternata se si dovranno alimentare utenze in corrente alternata.

L'altra tipologia, quella connessa in rete, presenta un'architettura di base semplice ovvero il solo campo fotovoltaico e l'inverter per poter generare energia elettrica e renderla direttamente disponibile all'utenza oppure scambiarla con la rete.



**Figura 5.2.** Sistema FV isolato: componenti principali



**Figura 5.3.** Sistema FV connesso alla rete: componenti principali

## IL GENERATORE FOTOVOLTAICO: I DISPOSITIVI

In questo capitolo tratteremo quelli che sono i dispositivi costituenti il generatore fotovoltaico che evidentemente non sono solo i moduli ma anche i quadri elettrici, gli inverter, le protezioni di interfaccia, i cavi, i connettori e tutto l'occorrente di cui tener conto in un progetto esecutivo.

Verificheremo le opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici con i quadri di parallelo, di campo e manovra e con l'inverter.

Parleremo del quadro di interfaccia e relative protezioni di connessione alla rete secondo la CEI 11-20 e CEI 0-21.

Redigeremo infine un esempio di schema elettrico di un impianto FV in parallelo alla rete elettrica di bassa tensione monofase e trifase.

### 6.1. Opzioni di collegamento di moduli fotovoltaici

Quasi tutti i moduli fotovoltaici in commercio sono dotati oltre che di scatola di giunzione, contenente i diodi di by-pass, anche di cavi e connettori per il cablaggio rapido.

La connessione dei moduli in un sistema di connessione in rete dove sia necessario arrivare a tensioni considerevoli risulta agevolata dai tipi di connettori maschio/femmina corrispondenti ad un relativo polo. Unendo quindi un maschio con una femmina avremo la connessione positivo negativo fino al numero di moduli e quindi alla tensione desiderata.

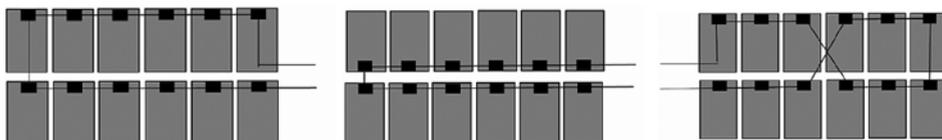
I connettori sono generalmente del tipo *Multicontact*, *Radox* o *Tyco* e sono dotati di guarnizioni tali da rendere le connessioni sicure e stagne.



**Figura 6.1.** Interconnessione dei moduli a costituire stringhe da attestare successivamente ad un quadro o inverter

Avvenuta la connessione tra modulo e modulo avremo bisogno di costituire una linea positivo-negativo di ogni stringa per giungere ad un quadro di campo o all'inverter. I moduli possono essere cablati in maniera differente di come vengono posati meccanicamente.

A seconda anche del posizionamento della scatola di giunzione si può optare per file parallele o, come nell'ultimo caso in figura, effettuare un cablaggio di stringa in modo da formare due spire con correnti opposte.



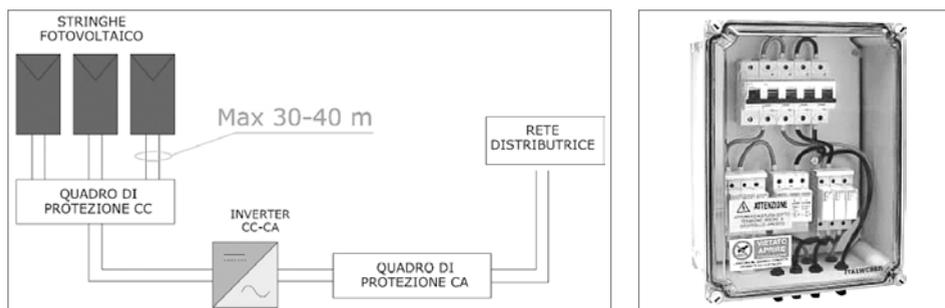
**Figura 6.2.** Cablaggio per file parallele o a formare due spire con correnti opposte

## 6.2. Quadro di parallelo, di campo e manovra

### 6.2.1. Sequenza dei dispositivi

Il collegamento moduli fotovoltaici/inverter viene realizzato con cavi di tipo solare a doppio isolamento FG21 con sezione da 4 a 6 mm<sup>2</sup>. Se l'inverter è vicino ai moduli fotovoltaici ovvero considerando la lunghezza totale del circuito in corrente continua di 30-40 m non si hanno perdite rilevanti per cui è possibile attestare le stringhe in una quadro dove avverrà il parallelo nei pressi dell'inverter. I montanti delle diverse stringhe vengono quindi collegati direttamente nel quadro di protezione in corrente continua posto direttamente sotto l'inverter. Tale quadro conterrà un dispositivo di sezionamento, fusibili di stringa, eventuali diodi di blocco e uno scaricatore di sovratensioni.

In commercio esistono quadri di parallelo già provvisti di connettori per stringa tipo MC.



**Figura 6.3.** Massima distanza Moduli / Quadro di manovra

Se l'inverter è lontano dai moduli fotovoltaici i montanti delle diverse stringhe vengono collegati in un quadro di campo da installare in prossimità del campo fotovoltaico.

Dal quadro di campo si esce con un unico montante per collegarsi al quadro di protezione c.c..

## REALIZZAZIONE DEI SISTEMI FOTOVOLTAICI

### 7.1. Le modalità di conduzione di un sopralluogo e di collaudo

Il sopralluogo è una delle operazioni fondamentali per la realizzazione di un impianto fotovoltaico perché si evitino:

- spiacevoli imprevisti in fase realizzativa;
- stime errate dei costi di installazione;
- stime errate della produzione energetica.

Solo attraverso un sopralluogo mirato è possibile verificare la reale fattibilità tecnica ed economica dell'intervento.

Conviene quindi verificare per prima cosa la fattibilità tecnica ed economica dell'intervento e in particolare, le verifiche devono riguardare:

- l'area di posa dei moduli;
- la presenza o meno di ombre;
- la condizione orografica dell'intorno del sito.

Gli strumenti utili per l'esecuzione di un buon sopralluogo in sito sono:

- bussola;
- clinometro: è lo strumento per la misura dell'inclinazione di un corpo. È costituito da una parte fissa e da una mobile, che consente di traguardare l'oggetto della misura;
- bindella metrica o metro elettronico;
- macchina fotografica.

È consigliabile la predisposizione di un modulo di raccolta dati la cui compilazione rappresenta il sistema di acquisizione delle informazioni più importante di ogni altra operazione.

In particolare, l'acquisizione di tali informazioni riguarderanno:

- Identificazione la miglior posizione per l'installazione tenendo presente:
  - orientamento della superficie di installazione;
  - tipo di struttura per il sostegno dei moduli;
  - acquisire materiale cartografico relativo all'area e al fabbricato in esame.
- Una volta stabilita l'area di installazione è necessario:
  - rilevare eventuali zone d'ombra;
  - scattare eventuali fotografie del previsto luogo di posa e della struttura esistente.

È importante in questa fase anche il rilievo dell'intorno del sito e quello orografico ovvero la verifica che l'area a disposizione non venga ombreggiata nella maggior parte delle ore di Sole utili anche nella stagione invernale.

Non è raro imbattersi in edifici che hanno un'ottima inclinazione ed esposizione della copertura ma posizionati ad esempio sul versante Sud di una vallata aperta da Est ad Ovest oppure in presenza di alta vegetazione o edifici contigui più alti e posizionati a Sud rispetto all'edificio in questione.

La perdita di produttività di queste tipologie di impianti può essere molto consistente e spesso può falsare un'analisi economica che non ha tenuto conto di tali fattori.

Al primo approccio con il cliente finale conviene raccogliere quindi quante più informazioni possibili sull'edificio e sul Comune; una buona pratica è farsi preparare per il sopralluogo una pianta della copertura ed altri dati cartografici dell'edificio utili alla redazione del progetto.

Oltre alla copertura e/o all'area che si ritiene utile per la posa del campo fotovoltaico occorre individuare un locale per l'installazione dell'inverter che sia il più vicino possibile al campo stesso ed infine un quadro elettrico generale che consenta l'inserimento di un dispositivo di sezionamento e protezione dedicato.

Occorre valutare le opere edili da prevedere per il cablaggio dei dispositivi quali fori e rispristini di murature e solai e il materiale accessorio occorrente come canaline, tubi e scatole di derivazione.

Occorre infine valutare le eventuali difficoltà logistiche che si possono verificare in fase di realizzazione per il trasporto e lo stoccaggio del materiale quali ad esempio la larghezza della strada, dell'accesso e l'acclività del terreno considerando che possono accedere al cantiere mezzi di trasporto anche di considerevoli dimensioni.

Di fondamentale importanza risulta quindi la compilazione del modulo raccolta dati necessario per la verifica di tutte le informazioni occorrenti per la redazione del progetto esecutivo e delle pratiche di connessione dell'impianto alla rete.

Nello specifico, trattandosi ad esempio di un impianto da realizzarsi su copertura di un edificio residenziale sarà fondamentale riportare una serie di valori quali:

- *Consumo medio annuo*: abbiamo visto che sono il principale dato di riscontro dalle bollette per un dimensionamento preliminare dell'impianto.
- *Potenza desiderata*: a prescindere dalle considerazioni di disponibilità di superficie piuttosto che economiche è possibile che alcuni clienti chiedano espressamente la realizzazione di un impianto di potenza pari al contratto di fornitura come un 3 kW per una classica utenza residenziale.
- *Produzione energetica annua desiderata*: generalmente è quella che possa coprire interamente i consumi medi annui dell'utenza con un impianto in regime di scambio sul posto con la rete.
- *Tipologia di pannelli*: può succedere che sia il cliente stesso a suggerire l'utilizzo di alcune tipologie di moduli fotovoltaici in quanto imposte dal Comune o utilizzate da edifici attigui quali silicio mono o policristallino, amorfo o altre tecnologie.

**Stralcio di un modulo di raccolta dati: informazioni relative al dimensionamento**

<b>5. Potenza desiderata (kWp):</b>			
<b>6. Produzione energetica annua desiderata (kWh/anno):</b>			
<b>7. Tipologia pannelli</b>			
Monocristallino	<input type="checkbox"/>	Policristallino	<input type="checkbox"/>
		Thin-Film	<input type="checkbox"/>

- *Tipologia di installazione*: verificare tra le diverse superfici disponibili la tipologia di installazione quale ad esempio a terra, tetto piano oppure tetto inclinato; per questa ultima soluzione conviene rilevare subito anche l'inclinazione e l'orientamento della falda.

## INTEGRAZIONE ARCHITETTONICA DEL SOLARE FOTOVOLTAICO

### 8.1. Le strutture di supporto

I sistemi fotovoltaici sono soggetti, per la loro tipica collocazione ed esposizione, ad azioni degli agenti atmosferici che ne mettono a dura prova la solidità e durezza.

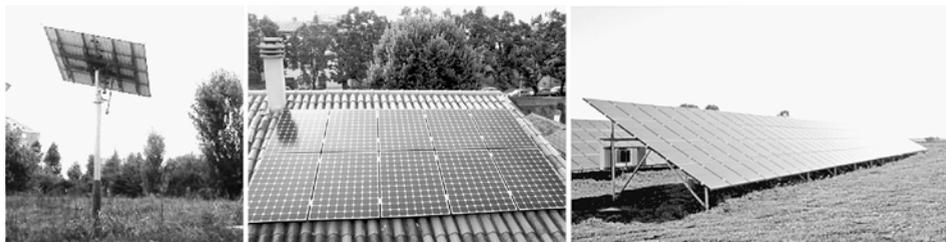
Le strutture di supporto di tali sistemi necessitano quindi di modalità di posa specifiche per soddisfare precisi requisiti quali la tenuta alle più comuni sollecitazioni meccaniche, termiche e di usura ma anche ad eventi ritenuti eccezionali.

Le tipologie di supporto dei moduli fotovoltaici sono essenzialmente di due tipi a seconda che il sistema sia **ad inseguimento** o **fisso**.

Mentre i sistemi ad inseguimento prevedono organi di movimentazione per appunto inseguire il Sole ed ottenere quanto più possibile l'irradianza incidente sul piano dei moduli, i sistemi di supporto fissi sono generalmente utilizzati per installazioni a terra, su edifici e pertinenze come pensiline e tettoie o elementi di arredo urbano oppure su qualsiasi superficie ben esposta alla radiazione solare.

La produttività di tali sistemi dipenderà quindi da una serie di fattori quali sicuramente l'orientamento e l'esposizione ma anche il tipo di integrazione architettonica ovvero la capacità di raffreddamento mediante ventilazione naturale o indotta.

La produttività dei sistemi ad inseguimento dipenderà dalla capacità di inseguire il Sole per avere la radiazione solare sempre incidente ovvero dal numero di assi di rotazione e dal sistema di gestione di cui sono dotati.



**Figura 8.1.** Esempi di strutture di supporto dei moduli fotovoltaici:  
*ad inseguimento, fisse su copertura, fisse a terra*

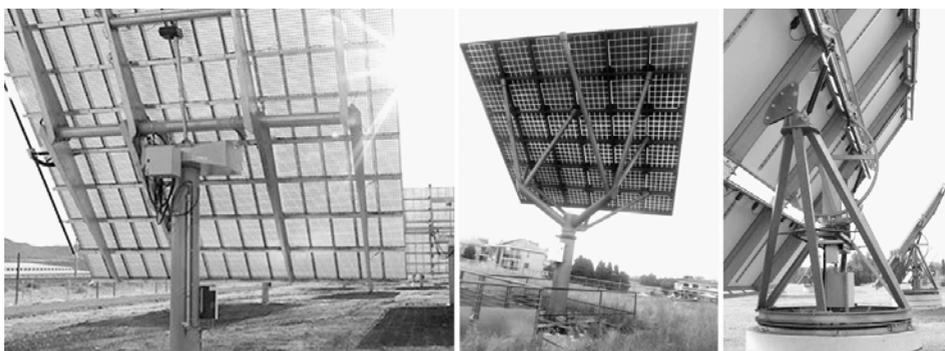
### 8.2. Il sistema ad inseguimento

Il sistema di supporto ad inseguimento, attraverso opportuni movimenti meccanici, permette di orientare il piano moduli il più possibile in maniera incidente rispetto alla radiazione solare in modo da incrementarne la potenza e quindi la produzione

I sistemi ad inseguimento sono utilizzati da sistemi fotovoltaici ma anche da sistemi solari termici, concentratori solari con riflettori o lenti. Lo scopo è quello di massimizzare l'efficienza del modulo nella produzione di energia elettrica e si possono classificare sulla in base di:

- il numero di assi e la loro orientamento, ovvero inseguitori mono-assiali di tilt, mono-assiali di rollio ed altre tecnologie;
- il tipo di meccanismo di orientamento;
- la tipologia di comando elettronico.

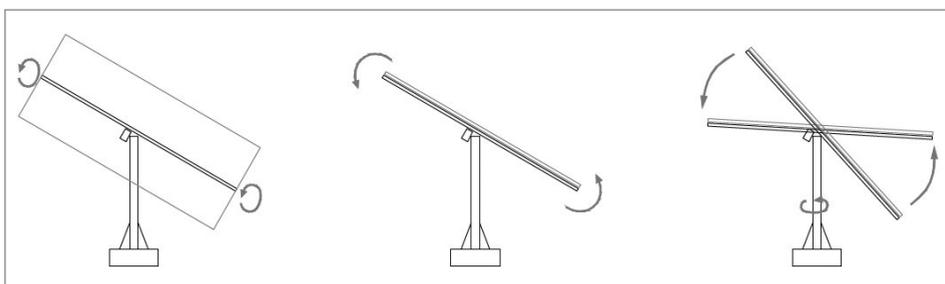
Un inseguitore mono-assiale permette una maggiore produzione di energia del 10-30% rispetto ad un impianto fisso, a seconda del tipo di montaggio e di movimento. Un inseguitore bi-assiale, invece, può permettere un incremento del 35-40%, a seconda dei diversi modelli.



**Figura 8.2.** Esempi di strutture ad inseguimento

Il sistema di inseguimento prevede diversi assi di rotazione con le seguenti caratteristiche:

- A) inseguitore monoasse con vela che ruota su un asse inclinato di  $30^\circ$ ; garantisce, rispetto ad un impianto fisso tradizionale, un rendimento stimato annuo del 32%. Rotazione della ralla inclinata di  $\pm 80^\circ$ .
- B) inseguitore monoasse con movimento Est-Ovest ( $\pm 120^\circ$ ) e angolo di tilt fisso ( $45^\circ$ ). Garantisce un 32% di resa in più rispetto ad un impianto fisso tradizionale.
- C) inseguitore biasse con movimento Est-Ovest ( $\pm 20^\circ$ ) e tilt (da  $20^\circ$  a  $70^\circ$ ) che raggiunge il 40% di resa in più rispetto ad un impianto fisso tradizionale.



**Figura 8.3.** Inseguitori di tipo A, B e C

## CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEGLI IMPIANTI FOTOVOLTAICI

### 9.1. Criteri di dimensionamento per area, esposizione, consumi e riqualificazione energetica

#### 9.1.1. Dimensionamento per area

Nel dimensionare un sistema fotovoltaico abbiamo sempre parlato di area disponibile o area utile: in questa fase dobbiamo rapportarci alla necessità di trasformare l'area utile in un piano moduli interfacciandoci con i prodotti presenti sul mercato, le caratteristiche strutturali ed i supporti per redigere un vero e proprio esecutivo.

In primo luogo dovremo avere a disposizione la marca ed il modello dei moduli fotovoltaici scelti e la taglia del sistema ovvero il numero di moduli totali da predisporre ad esempio sulla copertura in lamiera grecata di un edificio industriale. La particolarità di tali strutture sta nel fatto che spesso gli elementi portanti sono costituiti da travature ed arcarecci in acciaio alle quali viene ancorata la copertura mediante ganci; il passo tra gli elementi portanti difficilmente risulta lo stesso passo per l'installazione della struttura di supporto dei moduli. Questo si traduce nella necessità di realizzare una doppia struttura che consenta di realizzare i binari di supporto moduli incrociandoli su elementi trasversali a loro volta ancorati alla sottostruttura in acciaio.

Nell'esempio di **figura 9.1** (a pagina seguente) la linea tratteggiata rappresenta la sottostruttura che sorregge la copertura in travi di acciaio, i longheroni sono ancorati alla sottostruttura in senso trasversale e i profili orizzontali rappresentano i binari di appoggio dei moduli posti ad una distanza tale da rispettare il rapporto 25-50-25% sul lato maggiore.

Per il dimensionamento di un sistema è quindi necessario disporre all'area utile ma sicuramente di tutti gli elementi che ci consentano la disposizione definitiva del piano moduli ovvero:

- la scheda tecnica del modulo che verrà effettivamente utilizzato con riportate le misure, lo spessore e le caratteristiche della cornice;
- il numero esatto dei moduli configurati elettricamente; può essere utile ai fini di velocizzare l'installazione e ridurre il rischio di errori di cablaggio far corrispondere file con stringhe;
- le caratteristiche meccaniche della struttura di copertura per individuare i punti e le modalità di fissaggio.

Conviene cercare di disegnare il piano moduli possibilmente con la stessa forma della superficie ospitante; per un'area rettangolare è consigliabile mantenere tale geometria anche per il piano moduli. La configurazione può essere messa a punto anche provando a predisporre i moduli in orizzontale: tale disposizione dovrà prevedere la posa della struttura di sostegno sempre ortogonalmente al lato lungo dei moduli a meno di disposizioni particolari.

Nell'esempio riportato il piano moduli è stato organizzato in n. 5 file da 14 moduli cadauna per un totale di 70 moduli; anche elettricamente la configurazione risulta la medesima ovvero n. 5 stringhe da 14 moduli cadauna attestate poi ad un unico inverter.

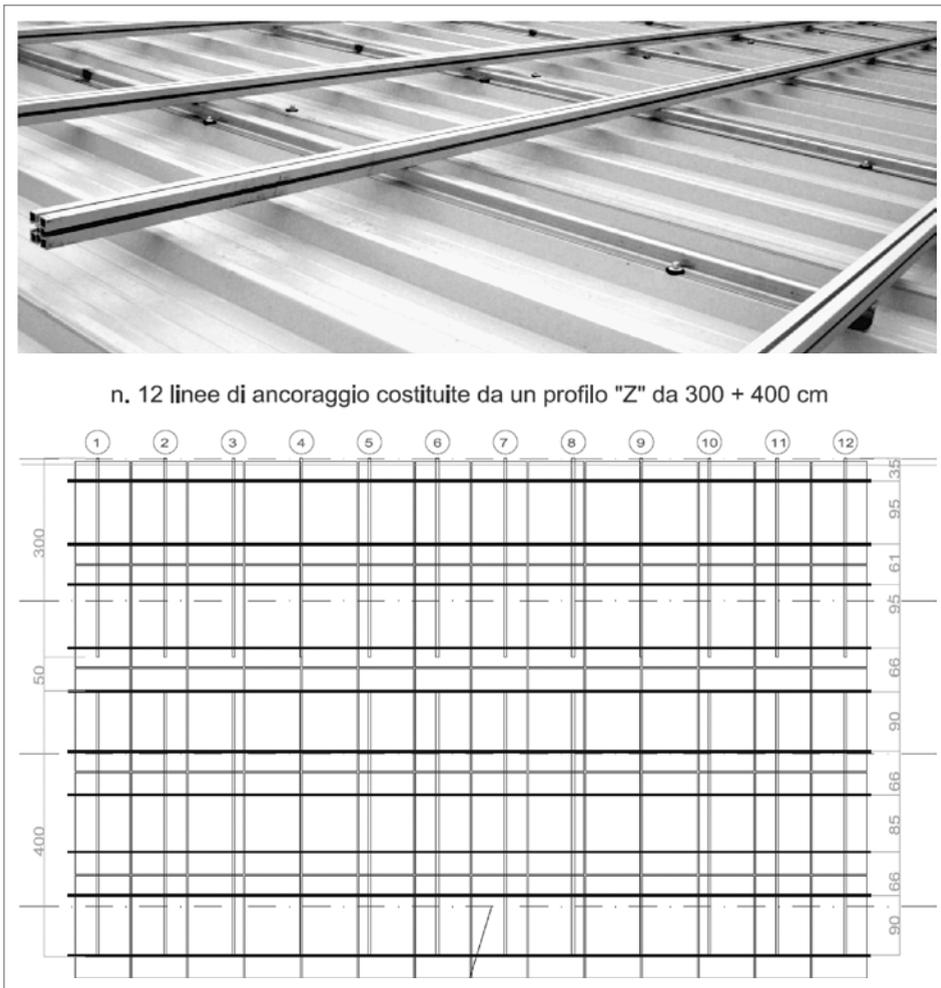


Figura 9.1. Struttura di sostegno a doppia orditura

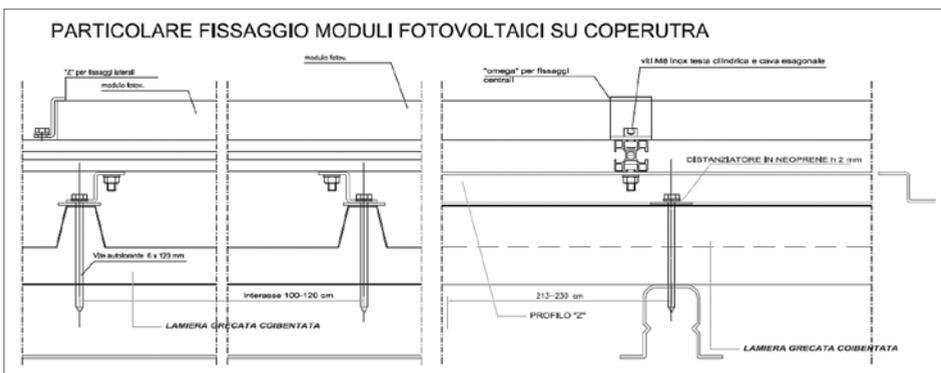


Figura 9.2. Dettaglio struttura di sostegno a doppia orditura

## APPLICAZIONI SPECIALI E CRITERI DI ALLACCIO

### 10.1. Smart Grid e CEI 0-21

Il decreto legislativo 16 marzo 1999, n. 79, recepimento della direttiva comunitaria 96/92/CE, introdusse in Italia la liberalizzazione del settore elettrico.

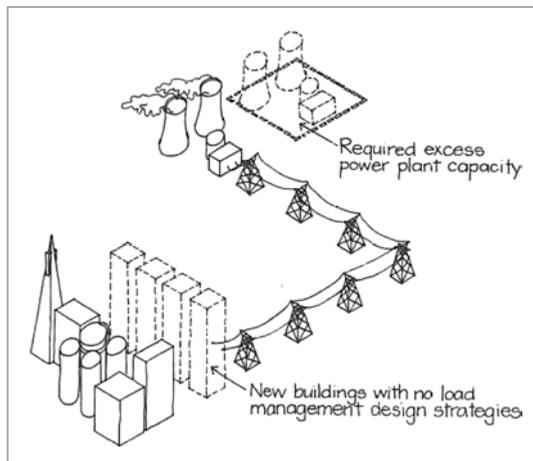
Gli effetti di questo decreto furono quelli di aprire un mercato elettrico che fin dalla nazionalizzazione del 1962 era di fatto monopolistico (per esempio con il solo operatore nazionale l'ENEL che poteva produrre e vendere energia elettrica agli utenti) ad altri operatori che diventano così concorrenti.

La rete elettrica, sempre stata fino a quel momento *unidirezionale*, distribuiva energia da pochi produttori a molti consumatori. Con tale provvedimento si aprì quindi la possibilità che ogni utente potesse diventare anche produttore attraverso, ad esempio, l'installazione di un generatore solare o d'impianti di produzione da altre fonti rinnovabili; per contro questo comporta la necessità di avere una *rete bidirezionale*.

Una rete cioè che possa trasportare oltre all'energia proveniente dai grandi impianti (ad esempio, una centrale termoelettrica), anche quella immessa in rete dai tanti piccoli produttori domestici e che eccede l'autoconsumo.

Questa produzione distribuita, però, essendo per gran parte legata a fonti rinnovabili, è per definizione intermittente: in assenza di vento, una pala eolica non può certo funzionare, così come un pannello fotovoltaico riduce sensibilmente la propria produzione in mancanza di Sole.

La rete elettrica è quindi sottoposta ad un importante rinnovamento; sarà infatti gestita mediante tecnologie intelligenti in grado di integrare tutti gli utenti o prodotti connessi distribuendo loro energia in modo efficiente.



In sintesi le reti elettriche, come le conosciamo noi, vengono utilizzate per distribuire ininterrottamente enormi quantità di energia dalle centrali di produzione ai consumatori; il controllo di questa energia è centralizzato e il flusso dell'energia è sempre lo stesso.

Ora se pensiamo al numero sempre crescente degli impianti di approvvigionamento di energia da fonti rinnovabili che sono sparsi sul nostro territorio, in grandi installazioni come anche su piccola scala nelle nostre abitazioni, oppure se pensiamo all'impatto che avrà a breve il passaggio dalla mobilità a combustibile a quella elettrica oppure l'incremento esponenziale dei sistemi di climatizzazione elettrici su scala nazionale ci accorgiamo che una rete elettrica come quella attuale non è in grado di gestire i flussi e i carichi.

La rete elettrica deve diventare elettronica: una *smart grid* appunto, che faccia interagire produttori e consumatori, in grado di determinare in anticipo le richieste di energia e convogliare il flusso elettrico là dove serve.

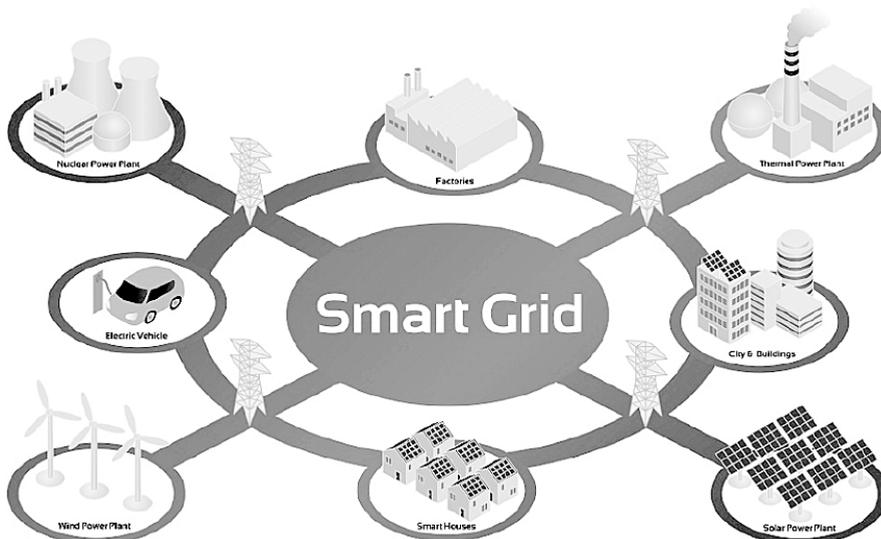
Una vera e propria rete intelligente, non solo di trasporto di energia in una sola direzione, ma bidirezionale e attiva con l'aiuto dell'elettronica, dell'informatica e della comunicazione.

Una rete composta di tante piccole reti che viaggiano tra produttori e consumatori, che comunicano tra loro e si scambiano informazioni; che gestiscono con migliore efficienza i picchi di richiesta, evitando interruzioni di elettricità e riducendo il carico dove necessario. Tutta la rete sarà tenuta sotto stretto monitoraggio per aver traccia di tutto il flusso elettrico del sistema.

Per fare un esempio, quando il costo dell'energia diventa conveniente una *smart grid* può decidere di attivare processi industriali oppure elettrodomestici casalinghi e le eventuali sovrapproduzioni di energia di alcuni luoghi possono essere distribuiti là dove ce ne sia necessità, in modo dinamico ed in tempo reale grazie al software di gestione.

### **Funzionamento**

Per capire ancora meglio possiamo usare come esempio la rete di internet, i meccanismi sono molto simili: tutti gli utenti sono interconnessi tra loro, ricevono e inviano informazioni e traggono vantaggio da questo scambio.



## GLI ASPETTI ECONOMICI DEL FOTOVOLTAICO

### 11.1. Il mercato mondiale del fotovoltaico

Relativamente alle rinnovabili elettriche, ovvero l'eolico e il fotovoltaico in primis, sono oltre 500 i GW eolici installati finora nel mondo. Nel 2016 l'eolico è la fonte che ha dominato nella classifica della nuova potenza installata in Europa e in molti paesi nel mondo. Anche il fotovoltaico realizzato su scala mondiale ha superato di recente un'altra soglia importante: 300 GW di potenza, di cui più di un terzo in Europa.

Si tratta quindi di due dei più rapidi sviluppi industriali di sempre, che i principali istituti di analisi finanziaria hanno stimato possano rappresentare fino al 2040 quasi i tre quarti di tutti i nuovi investimenti nel settore energetico, pari a 10.200 miliardi di dollari (di cui 4 solo in Cina e India). Oltre ad incrementare il recente sviluppo del processo di *decarbonizzazione* legato al settore energia, il settore rinnovabili quasi sicuramente potrà determinare una discesa stimata del 4% annuo delle emissioni dal 2026 rispetto al 2016.

Nonostante la prevista fine di molti incentivi a favore delle rinnovabili, il continuo e rapido calo dei costi delle due tecnologie sopra citate, la crescita del comparto delle batterie e dei veicoli elettrici condizioneranno gli sviluppi delle dinamiche dell'intero comparto elettrico ed energetico.

In estrema sintesi, dai dati disponibili sembra emergere il dato che *«l'elettrificazione verde è ormai inarrestabile»*.

Sul più breve termine risulta evidente che il fotovoltaico, la tecnologia con la crescita più rapida, seguito dall'energia eolica, attireranno rispettivamente il 37,5% e il 21% degli investimenti globali entro il 2020.

Vediamo meglio qui alcuni aspetti salienti delle previsioni dei principali operatori finanziari partendo dall'Outlook 2017:

- Solare fotovoltaico ed eolico domineranno il futuro dell'elettricità.
- Saranno pari a circa 7.400 miliardi di dollari gli investimenti in nuovi impianti a fonte rinnovabile entro il 2040, cioè il 72% di tutti quelli nel settore energetico mondiale.
- Il solare potrà crescere di 14 volte rispetto a oggi in termini di potenza installata (2.800 miliardi di dollari di investimenti). L'eolico aumenterà di potenza di 4 volte con una spesa di 3.300 mld di \$.

Mentre oggi l'eolico e il solare rappresentano insieme il 12% della capacità installata globale e il 5% della generazione elettrica, nel 2040 queste quote cresceranno, rispettivamente, al 48% e al 34%.

Il costo sul ciclo di vita dell'impianto tutto incluso – detto anche LCOE – dell'energia elettrica da fotovoltaico è oggi circa un quarto di quanto era nel 2009, ma a questo calo si aggiungerà un'ulteriore diminuzione del 66% entro l'orizzonte temporale prevista dai principali report, cioè il 2040. A questa data con un dollaro si potrà acquistare 2,3 volte più energia solare di oggi. Anche per questo si prevede una notevole diffusione degli impianti su tetto soprattutto in Austra-

lia (con una loro quota di generazione del 24% sulla domanda elettrica del paese), in Brasile, Germania e Giappone.

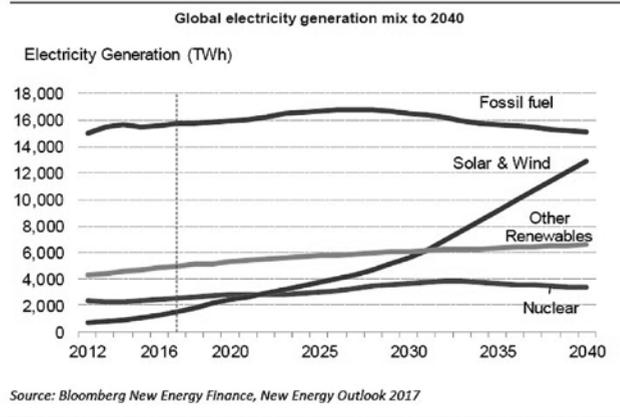
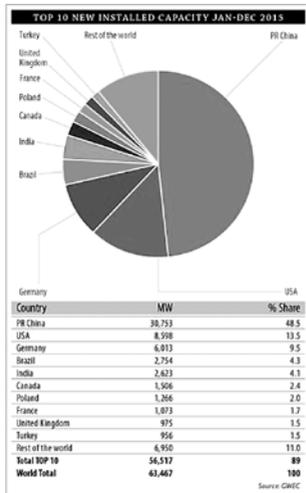


Figura 11.1. Crescita delle rinnovabili a livello globale

### La competizione con le fossili

Secondo queste analisi il FV è già oggi sui livelli del carbone in Germania, Australia, Usa, Spagna e Italia. Nel 2021 sarà più economico del carbone anche in Cina, India, Messico, UK e Brasile. Proprio sul carbone si prevede che gli impianti termoelettrici alimentati con questa fonte fossile crolleranno certamente in Europa e negli Usa (molti i GigaWatt che verranno cancellati), continueranno a crescere un po' in Cina, ma raggiungeranno il loro picco di diffusione mondiale nel 2026.

Anche per l'eolico su terraferma i costi saranno in calo, di circa il 47% al 2040, dopo che negli ultimi 8 anni sono diminuiti di circa il 30%, grazie a macchine più performanti e procedure operative più standardizzate e semplificate.

Ma il calo più impressionante sarà nell'ambito del comparto offshore, dove si prevede una diminuzione del costo sul ciclo di vita dell'impianto di circa il 71%, anche per le economie di scala di centrali e turbine sempre più grandi.

Dentro questo sviluppo si incasteranno altre innovazioni e un contributo sempre maggiore degli accumuli, questi ultimi protagonisti anche della funzione di equilibrio e flessibilità del sistema elettrico rispetto ai picchi della domanda, tanto che lo *storage utility-scale*, in questo ruolo, sarà tra i principali rivali degli impianti di generazione alimentati a gas naturale.

Il gas naturale non avrà un peso così rilevante, come molti pensano nella transizione alle rinnovabili, con appena il 16% della nuova potenza realizzata al 2040.

Avrà più un ruolo nella *gestione della flessibilità del sistema elettrico*, piuttosto che di rimpiazzo di fonte primaria ricoperto finora dalle centrali a carbone, forse con l'unica eccezione, nel breve termine, degli Usa dove è ancora molto economico e abbondante.

## CASI STUDIO

### 12.1. Impianto da 4,5 kWp a servizio di una utenza privata

Viene per prima cosa redatto uno studio di fattibilità volto alla verifica tecnico-economica per la realizzazione di un sistema solare FV da installare sulla copertura di un edificio sito in Piemonte in una frazione del Comune di Settimo Torinese.

Il dimensionamento viene formulato in seguito a sopralluogo ed alla verifica delle aree effettivamente disponibili, al netto delle superfici soggette a persistenti fenomeni di ombreggiamento dovuti alla presenza di balaustre, camini, sfiati, alberi, pali ed edifici limitrofi.

Nell'ottica di realizzare un sistema solare fotovoltaico che sia in grado di contribuire efficacemente all'approvvigionamento energetico annuale dell'edificio, nelle condizioni geografiche ed ambientali di sito e tenuto conto della tipologia e morfologia dell'edificio su cui sarà installato l'impianto, viene proposta e descritta la migliore soluzione tecnica individuata.

I dati relativi al sito vengono riassunti in una tabella e viene valutata la migliore superficie esposta nel quadrante Sud Est – Sud Ovest.



Figura 12.1. Inquadramento e parametri climatici

A questo punto è possibile calcolare, partendo dai dati di irraggiamento della località in esame, l'irraggiamento sulla superficie considerata ovvero stima dell'irraggiamento solare sul piano moduli secondo UNI 10349.

Consideriamo adesso la caratteristica dei consumi utenza per stima energia in autoconsumo.

I consumi dell'utenza si attestano sui 4700 kWh all'anno e considerando l'importo delle bollette possiamo stimare un costo medio del kWh di circa 23 centesimi di euro.

L'utenza ha un consumo concentrato nelle ore diurne (F1) essendo gli utenti stessi attivi proprio nelle ore centrali della giornata: questo fa sì che si possa contare su un alto autoconsumo stimabile per i carichi presenti nell'ordine del 60%.

La superficie disponibile sulla falda Sud-Ovest è di oltre 60 m<sup>2</sup> e, considerando i consumi e le ipotesi di incremento a fronte dell'installazione di pompe di calore per il riscaldamento dell'acqua sanitaria e la deumidificazione del piano terra, si ipotizza la realizzazione di un impianto di 4,5 kWp.

Considerando una tecnologia di tipo monocristallino con efficienza media del 16-17% otterremmo un'occupazione di falda utile di 27 m<sup>2</sup> circa.

### 12.1.1. Composizione del sistema fotovoltaico

Per il dimensionamento del campo FV, si è considerato l'impiego di moduli fotovoltaici SHARP di produzione europea in silicio monocristallino con efficienza di conversione pari al 17% ovvero potenza di 170 W/m<sup>2</sup> di moduli installato, modello NU-RD 280 da 280 Wp.

Il sistema fotovoltaico proposto è composto quindi da 16 moduli fotovoltaici da 280 Wp ciascuno per una potenza nominale complessiva pari a 4,48 kWp.

Il sistema di conversione è effettuato mediante un inverter ABB modello PVI 4.2 Outdoor provvisto di sezionatore corrente continua.

L'organizzazione prevede la realizzazione di 2 stringhe da 8 moduli cadauna attestate rispettivamente agli inseguitori MPPT 1 e 2 in ingresso all'inverter

CARATTERISTICHE DELL'UTENZA ELETTRICA (valori bimestrali stimati)				PRODUZIONE ELETTRICA MEDIA MENSILE		
Consumi Elettrici (bolletta)	kWh	Importo	€/kWh	Periodo	Consumi kWh	Produzione kWh
Dig-Gen	850	196	€ 0,23	Gennaio	420	229
Feb-Mar	830	191	€ 0,23	Febbraio	430	319
Apr-Mag	770	177	€ 0,23	Marzo	430	458
Giu-Lug	690	159	€ 0,23	Aprile	400	497
Ago-Set	754	173	€ 0,23	Maggio	390	563
Ott-Nov	860	198	€ 0,23	Giugno	380	587
<b>Totale Anno</b>	<b>4754</b>	<b>1093</b>	<b>€ 0,23</b>	Luglio	400	644
				Agosto	290	578
Percentuale Autoconsumo	60%	→ kWh/anno	3060	Settembre	370	470
Percentuale Scambio con la rete	40%	→ kWh/anno	2040	Ottobre	384	328
				Novembre	410	221
				Dicembre	450	208
				<b>Anno</b>	<b>4.754</b>	<b>5.100</b>

Figura 12.2. Consumi utenza e produzione stimata

### 12.1.2. Cenni sul progetto esecutivo

Il lato in corrente continua dell'impianto FV comprende i moduli fotovoltaici, il quadro di campo e manovra, i relativi cavi di collegamento e termina ai morsetti di ingresso dell'inverter.

È esercito come sistema IT, ovvero senza punti direttamente collegati a terra.

Il campo fotovoltaico è organizzato con stretto riferimento allo schema elettrico multifilare (da allegare alla relazione tecnica):

- le due stringhe sono realizzate connettendo in serie 8 moduli fotovoltaici tramite gli appositi connettori rapidi premontati;
- i terminali di stringa sono riportati alle morsettiere del quadro di campo e manovra, posto presso l'inverter, utilizzando cavi unipolari di tipo FG21M21 ed FG7 R da 0,6/1 kV 1×6 mm<sup>2</sup>, intestati da un lato con gli appositi connettori rapidi ed adattatori, rispettando le giuste polarità;
- al quadro di campo e manovra giunge un cavo unipolare giallo/verde di tipo NO7V da 6 mm<sup>2</sup> proveniente dal morsetto di terra dell'inverter;

## INSTALLAZIONE DEL SOFTWARE INCLUSO

### Note sul software incluso

Il software incluso installa i seguenti contenuti:

- **Fogli Excel per operare nell’ambito della progettazione di Impianti FV:**
  1. Foglio Excel per il dimensionamento elettrico moduli/inverter previa compilazione dei dati desunti dalle schede tecniche dei dispositivi previsti. È inoltre possibile dimensionare la sezione dei cavi in relazione alla lunghezza dei circuiti e alle perdite elettriche ammesse lato CC e lato AC.
  2. Foglio Excel per il calcolo di produttività dell’impianto previa compilazione dei dati desunti dalle schede tecniche dei dispositivi previsti. Tale calcolo permette di valutare il PayBack dell’investimento e i benefici ambientali. È inoltre possibile la redazione di un’offerta economica *chiavi in mano* mediante un computo metrico dedicato.
  3. Foglio Excel per l’analisi finanziaria dell’impianto previa compilazione dei dati relativi alla produzione unitaria, tassi d’interesse e costi previsti. Tale calcolo permette di valutare il PayBack dell’investimento insieme al Tasso di Rendimento Interno.
- **Link ai siti web dei principali operatori del settore** che mettono a disposizione software per il dimensionamento dei dispositivi.
- **Glossario** (termini più ricorrenti sull’argomento).
- **FAQ** (risposte alle domande più frequenti).
- **Test base / Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell’argomento).

### Requisiti hardware e software

- Processore da 2.00 GHz;
- MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore);
- MS .Net Framework 4 e vs. successive;
- 250 MB liberi sull’HDD;
- 2 GB di RAM;
- MS Excel 2007 e vs. successive;
- Accesso ad internet e browser web.

### Download del software e richiesta della password di attivazione

1) Collegarsi al seguente indirizzo internet:

**[http://www.grafill.it/pass/983\\_3.php](http://www.grafill.it/pass/983_3.php)**

2) Inserire i codici “A” e “B” (vedi ultima pagina del volume) e cliccare [**Continua**].

- 3) **Per utenti registrati** su [www.grafill.it](http://www.grafill.it): inserire i dati di accesso e cliccare [**Accedi**], accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**].
- 4) **Per utenti non registrati** su [www.grafill.it](http://www.grafill.it): cliccare su [**Iscriviti**], compilare il form di registrazione e cliccare [**Iscriviti**], accettare la licenza d'uso e cliccare [**Continua**].
- 5) Un **link per il download del software** e la **password di attivazione** saranno inviati, in tempo reale, all'indirizzo di posta elettronica inserito nel form di registrazione.

### Installazione ed attivazione del software

- 1) Scaricare il setup del software (file \*.exe) cliccando sul link ricevuto per e-mail.
- 2) Installare il software facendo doppio-click sul file **88-8207-984-0.exe**.
- 3) Avviare il software:

Per utenti MS Windows Vista/7/8: [**Start**] > [**Tutti i programmi**] > [**Grafill**] > [**Progettazione Impianti Solari FV**] (cartella) > [**Progettazione Impianti Solari FV**] (icona di avvio)

Per utenti MS Windows 10: [**Start**] > [**Tutte le app**] > [**Grafill**] > [**Progettazione Impianti Solari FV**] (icona di avvio)

- 4) Compilare la maschera *Registrazione Software* e cliccare su [**Registra**].
- 5) Dalla finestra *Starter* del software sarà possibile accedere ai documenti disponibili.



Gli argomenti trattati in questa guida mirano ad un approfondimento su temi quali le fonti rinnovabili negli edifici, il risparmio energetico e il sistema edificio-impianto.

Partendo dall'attività quotidiana di progettazione questo manuale ha come obiettivo quello di essere una guida pratica ed applicativa per i professionisti che operano nel settore dell'efficienza energetica degli edifici (ingegneri, architetti, geometri e periti) nei diversi step della progettazione, al fine di raggiungere i requisiti minimi di legge, applicare soluzioni tecnologiche e produrre elaborati tecnici.

La guida quindi analizza nel dettaglio gli aspetti normativi trasversali, sintetizzandoli al contempo in elenchi e tabelle di rapida consultazione, descrive con casi reali le metodologie di calcolo utilizzate per rendere più facile l'applicazione all'attività professionale quotidiana e fornisce casi studio che possono indirizzare i professionisti verso le scelte tecnologiche più opportune in relazione al tipo di edificio e alle sue condizioni al contorno.

### NOTE SUL SOFTWARE INCLUSO

Il software incluso installa i seguenti contenuti:

– **Fogli Excel per operare nell'ambito della progettazione di Impianti FV:**

1. Foglio Excel per il dimensionamento elettrico moduli/inverter previa compilazione dei dati desunti dalle schede tecniche dei dispositivi previsti. È inoltre possibile dimensionare la sezione dei cavi in relazione alla lunghezza dei circuiti e alle perdite elettriche ammesse lato CC e lato AC.
2. Foglio Excel per il calcolo di produttività dell'impianto previa compilazione dei dati desunti dalle schede tecniche dei dispositivi previsti. Tale calcolo permette di valutare il PayBack dell'investimento e i benefici ambientali. È inoltre possibile la redazione di un'offerta economica chiavi in mano mediante un computo metrico dedicato.
3. Foglio Excel per l'analisi finanziaria dell'impianto previa compilazione dei dati relativi alla produzione unitaria, tassi d'interesse e costi previsti. Tale calcolo permette di valutare il PayBack dell'investimento insieme al Tasso di Rendimento Interno.

– **Link ai siti web dei principali operatori del settore** che mettono a disposizione software per il dimensionamento dei dispositivi.

– **Glossario** (termini più ricorrenti sull'argomento).

– **FAQ** (risposte alle domande più frequenti).

– **Test base / Test avanzato** (verifiche sulla conoscenza dell'argomento).

**Requisiti hardware e software:** Processore da 2.00 GHz; MS Windows Vista/7/8/10 (è necessario disporre dei privilegi di amministratore); MS .Net Framework 4 o vs. successive; 250 MB liberi sull'HDD; 2 GB di RAM; MS Excel 2007 e vs. successive; Accesso ad internet e browser web.

**Jose Perfetto**, libero professionista, Energy Manager e consulente esperto nella progettazione eco-compatibile di sistemi attivi e passivi utilizzando fonti di energia rinnovabile. È fondatore dello studio Solar design attraverso il quale svolge incarichi volti al miglioramento dell'efficienza energetica e alla generazione da fonte solare. Didatta in ambito accademico e professionale per Ordini e Operatori del settore, Enti pubblici ed Aziende, ha al suo attivo numerose pubblicazioni scientifiche, attività di ricerca e sviluppo delle nuove tecnologie ed applicazioni in ambito civile ed industriale.

ISBN 13 978-88-8207-984-0



9 788882 079840 >