

F. Bignucolo – Impianti di produzione dell'energia elettrica

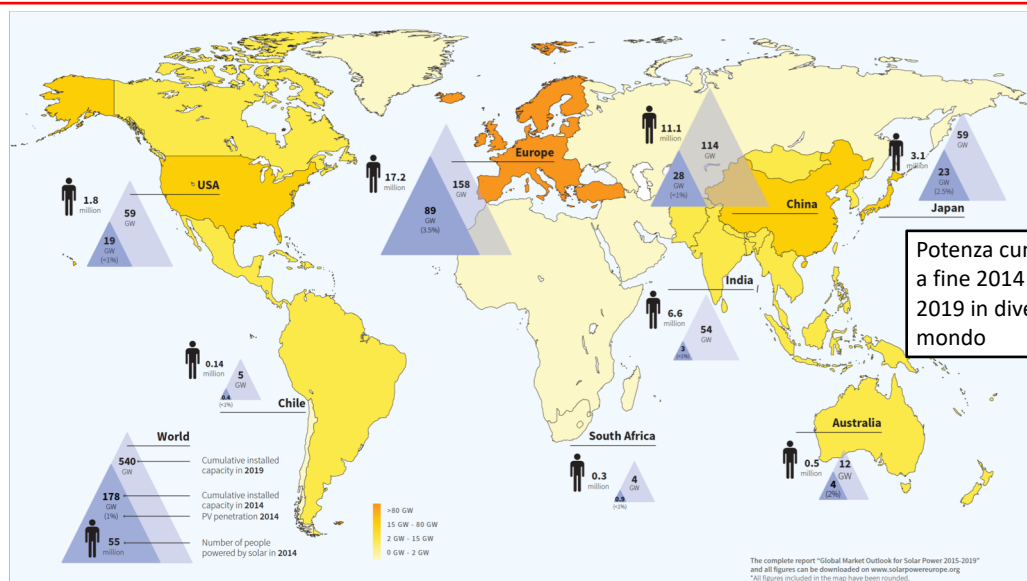
SEZIONE B – IMPIANTI DI PRODUZIONE A FONTE RINNOVABILE

Capitolo 5

Impianti fotovoltaici

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici

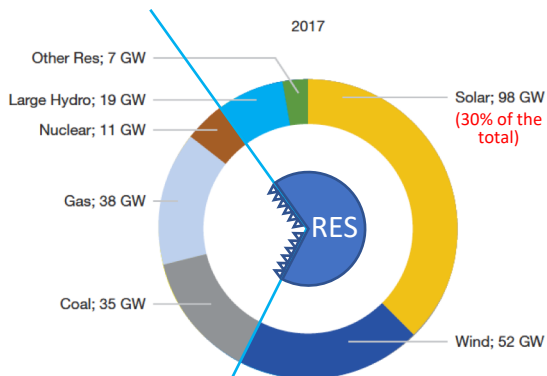


(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2014)

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici

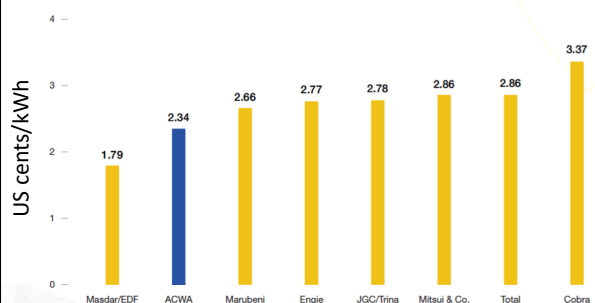
FIGURE 1 NET POWER GENERATING CAPACITY ADDED IN 2017 BY MAIN TECHNOLOGY



Source: Frankfurt School-UNEP Centre and BNEF (2018)

- FV ha la maggiore potenza installata nel 2017 (mondo)
- Il costo del kWh FV è comparabile con altre fonti in alcune località

FIGURE 3 TOP 8 TECHNICAL BIDS FOR 300 MW SAKAKA PV PROJECT IN SAUDI ARABIA



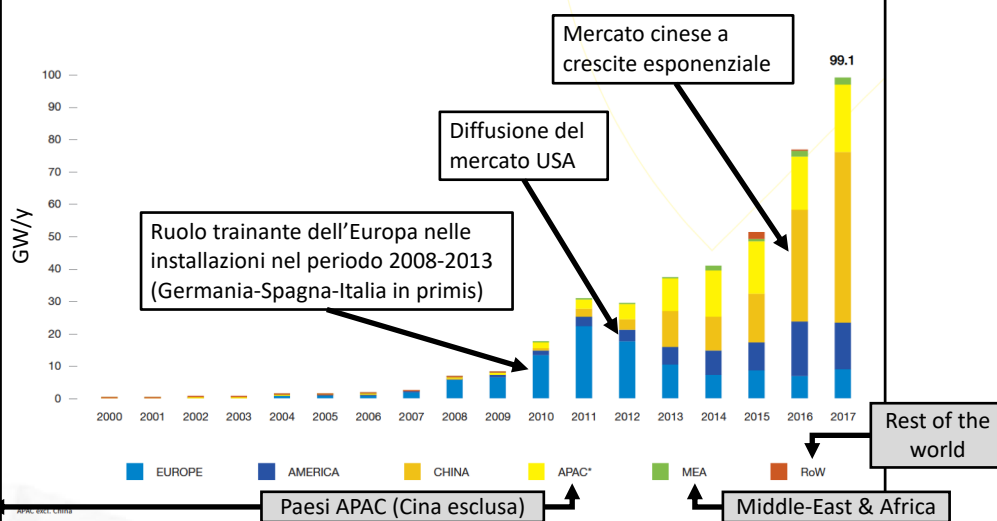
(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

3

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici

FIGURE 5 EVOLUTION OF GLOBAL ANNUAL SOLAR PV INSTALLED CAPACITY 2000-2017

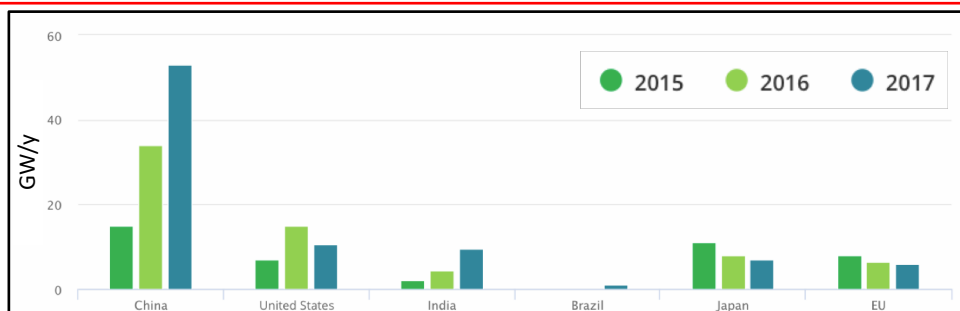


(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

4

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici



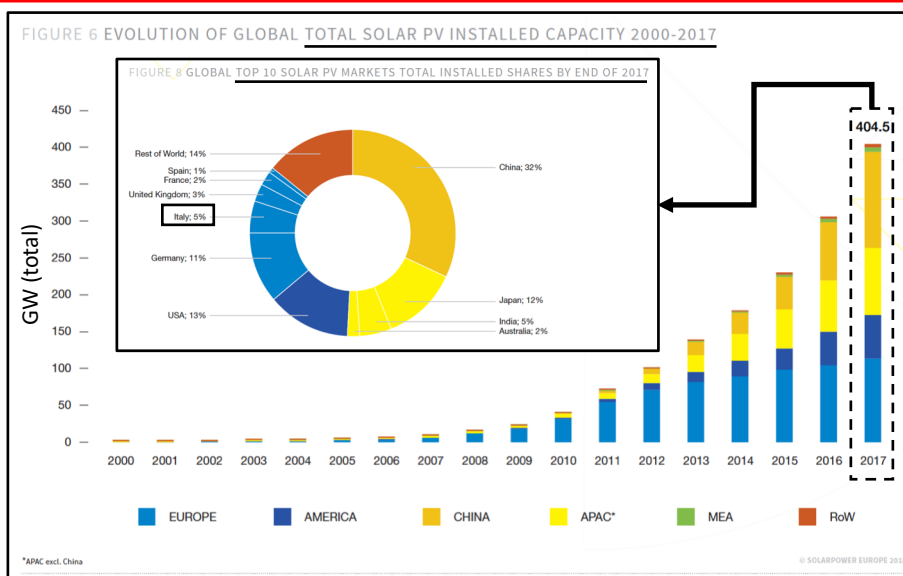
(fonte: IEA, dati consuntivi 2018)

- **Potenza installata 95-98 GW nel 2017** (di cui 53 GW in Cina)
- Mercato in espansione, ma i prezzi del FV sono attesi in diminuzione per l'aumento della capacità produttiva
- La Cina produce più dei **2/3 dei moduli fotovoltaici**
- **USA** sono il secondo mercato fotovoltaico a livello mondiale (sebbene l'installato 2017, 10,6 GW, sia in calo rispetto all'anno precedente)
- Il mercato dell'**India** è in fase esponenziale (potenza installata nel 2017 9,6 GW, più del doppio del 2016)
- Il **Giappone** (120% della superficie IT, 200% della popolazione IT) ha installato nel triennio 2015-2017 più potenza dell'intera **Europa** (dove il mercato complessivo annuo è appena inferiore a 6 GW)
- Gli investimenti PV hanno superato nel 2017 l'ammontare complessivo di **145 mld USD** (nonostante una riduzione dei costi di installazione del 13%)

5

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici



(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

6

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: quale futuro?

FIGURE 9 WORLD ANNUAL SOLAR PV MARKET SCENARIOS 2018 - 2022

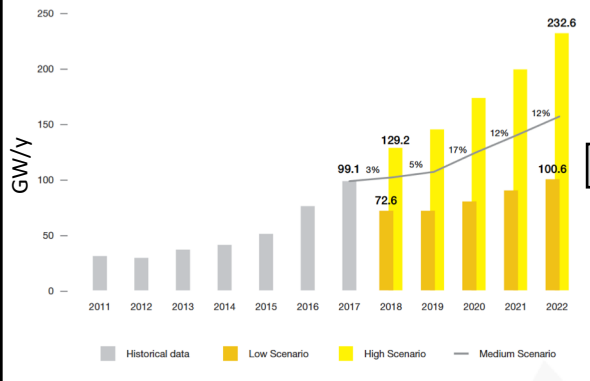
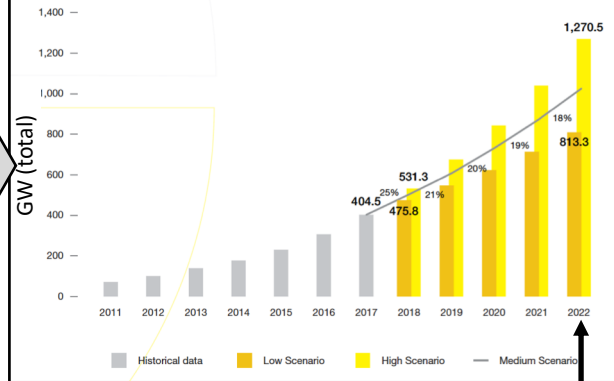


FIGURE 10 WORLD TOTAL SOLAR PV MARKET SCENARIOS 2018 - 2022



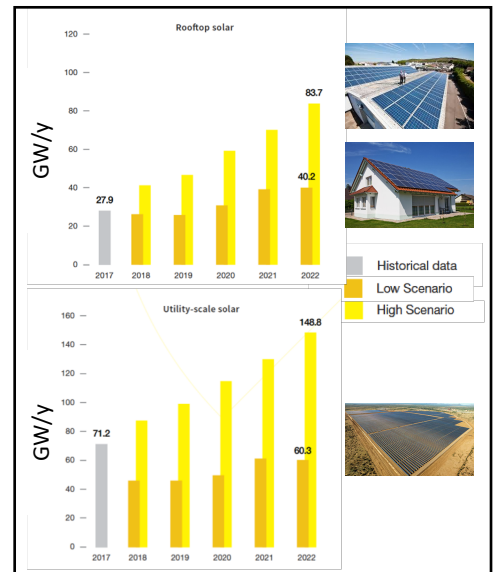
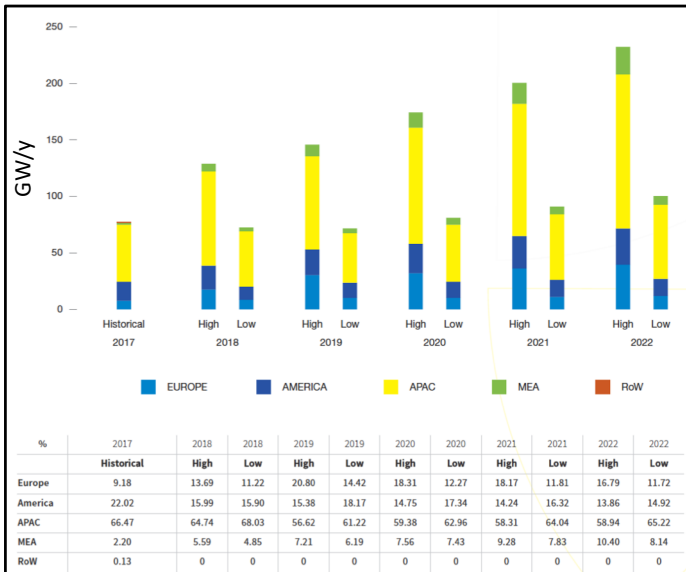
Over **1 TW**
solar power by 2022

(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

7

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: quale futuro?

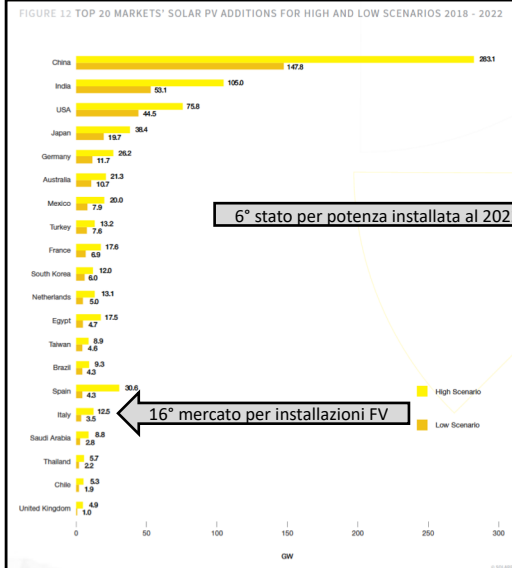


(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

8

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: quale futuro?



6° stato per potenza installata al 2022

16° mercato per installazioni FV

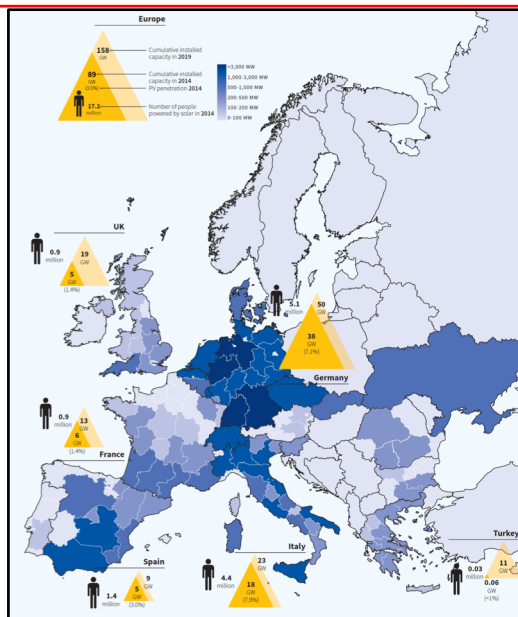
FIGURE 13 TOP GLOBAL SOLAR PV MARKETS' PROSPECTS

| | 2017 Total Capacity (MW) | 2022 Total Capacity Medium Scenario by 2022 (MW) | 2018 - 2022 New Capacity (MW) | 2018 - 2022 Compound Annual Growth Rate (%) | Political support prospects |
|----------------|--------------------------|--|-------------------------------|---|-----------------------------|
| China | 130,751 | 339,751 | 209,000 | 21% | 🟡 |
| United States | 51,527 | 114,170 | 62,643 | 17% | 🟡 |
| India | 19,047 | 97,431 | 78,384 | 39% | 🟡 |
| Japan | 49,251 | 78,551 | 29,300 | 10% | 🟡 |
| Germany | 42,973 | 63,237 | 20,264 | 8% | 🟡 |
| Italy | 19,392 | 26,924 | 7,533 | 7% | 🟡 |
| Australia | 7,308 | 22,969 | 15,662 | 26% | 🟡 |
| France | 7,999 | 19,702 | 11,703 | 20% | 🟡 |
| Mexico | 1,174 | 15,252 | 14,078 | 67% | 🟡 |
| United Kingdom | 12,676 | 14,742 | 2,065 | 3% | 🟡 |
| South Korea | 5,480 | 14,497 | 9,017 | 21% | 🟡 |
| Spain | 5,627 | 14,460 | 8,833 | 21% | 🟡 |
| Turkey | 3,420 | 14,320 | 10,900 | 33% | 🟡 |
| Egypt | 80 | 11,750 | 11,670 | 171% | 🟡 |
| Netherlands | 2,681 | 11,430 | 8,750 | 34% | 🟡 |
| Brazil | 1,147 | 8,442 | 7,295 | 49% | 🟡 |
| Taiwan | 1,733 | 8,386 | 6,653 | 37% | 🟡 |
| Saudi Arabia | 19 | 7,070 | 7,051 | 227% | 🟡 |
| Thailand | 2,697 | 6,159 | 3,462 | 18% | 🟡 |
| Pakistan | 894 | 5,787 | 4,892 | 45% | 🟡 |

(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

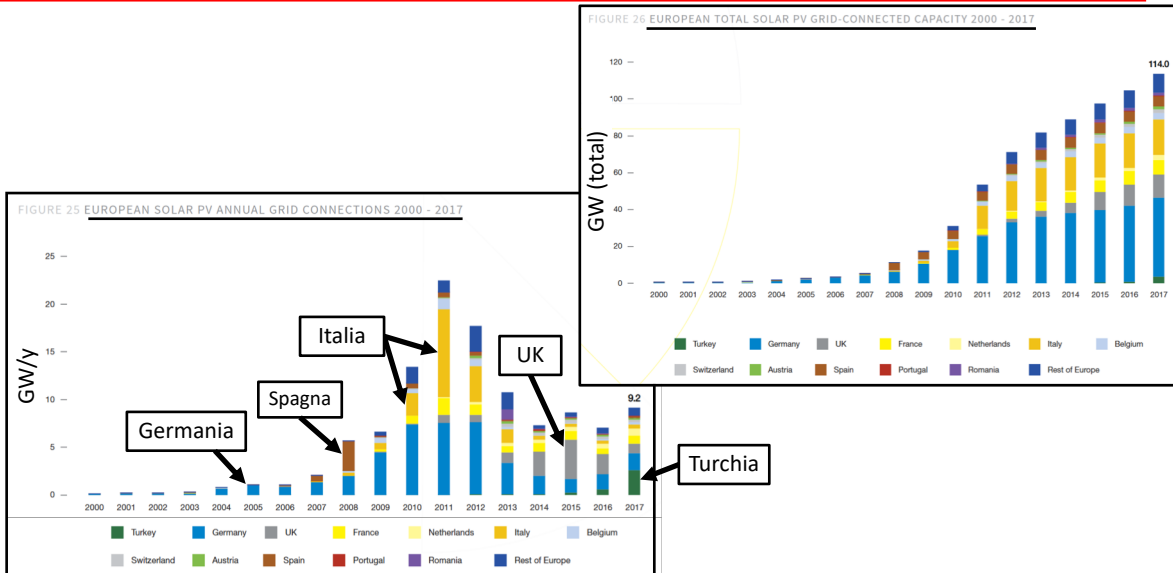
Evoluzione del fotovoltaico su scala europea: dati storici



(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2014)

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala europea: dati storici

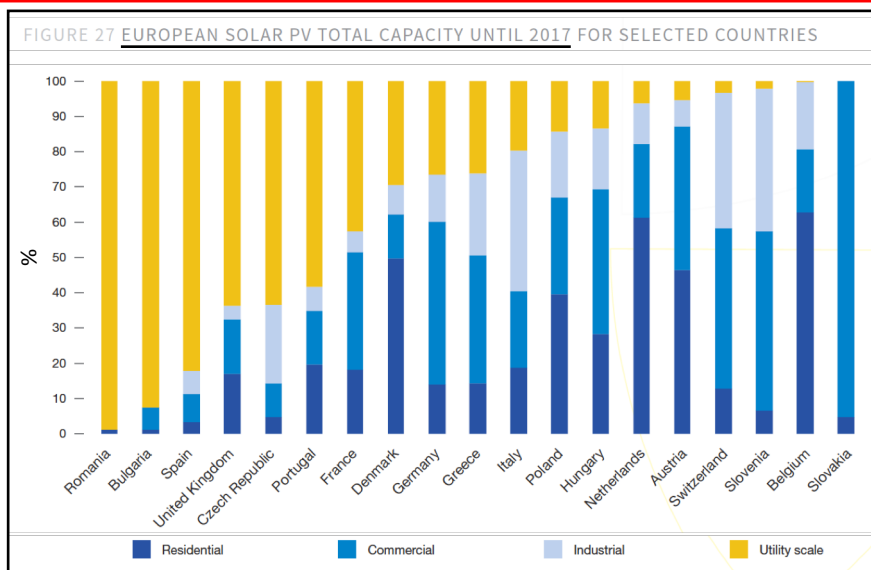


(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

11

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala europea: dati storici



(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

12

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala europea: dati storici

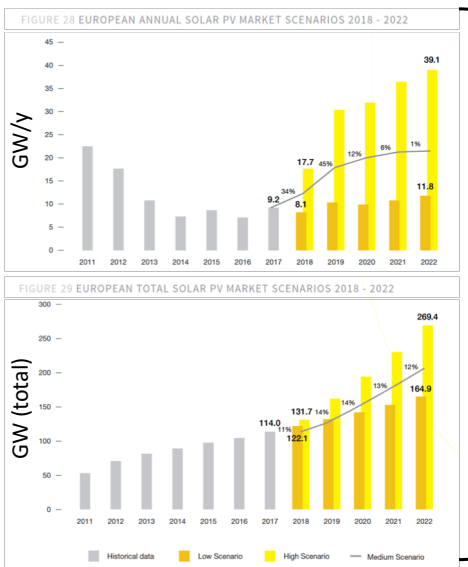


FIGURE 32 TOP EUROPEAN SOLAR PV MARKETS' PROSPECTS

| Country | 2017 Total Capacity (MW) | 2022 Total Capacity Medium Scenario by 2022 (MW) | 2018-2022 New Capacity (MW) | 2018-2022 Compound Annual Growth Rate (%) | Political support prospects |
|----------------|--------------------------|--|-----------------------------|---|-----------------------------|
| Germany | 42,973 | 63,237 | 20,264 | 8% | 🟡🟡 |
| France | 7,999 | 19,702 | 11,703 | 20% | 🟡 |
| Turkey | 3,420 | 14,320 | 10,900 | 33% | 🟡🟡 |
| Spain | 5,627 | 14,460 | 8,833 | 21% | 🟡 |
| Netherlands | 2,681 | 11,430 | 8,750 | 34% | 🟡 |
| Italy | 19,392 | 26,924 | 7,533 | 7% | 🟡🟡 |
| Ukraine | 1,152 | 4,435 | 3,283 | 31% | 🟡 |
| Poland | 261 | 2,361 | 2,099 | 55% | 🟡🟡 |
| United Kingdom | 12,676 | 14,742 | 2,065 | 3% | 🟡 |
| Switzerland | 1,955 | 3,957 | 2,003 | 15% | 🟡 |
| Russia | 158 | 1,988 | 1,830 | 66% | 🟡 |
| Austria | 1,263 | 2,922 | 1,659 | 18% | 🟡 |
| Belgium | 3,708 | 5,325 | 1,617 | 8% | 🟡🟡 |
| Greece | 2,623 | 4,210 | 1,587 | 10% | 🟡 |
| Sweden | 317 | 1,601 | 1,284 | 38% | 🟡 |
| Rest of Europe | 7,651 | 14,172 | 6,521 | 13% | 🟡🟡 |

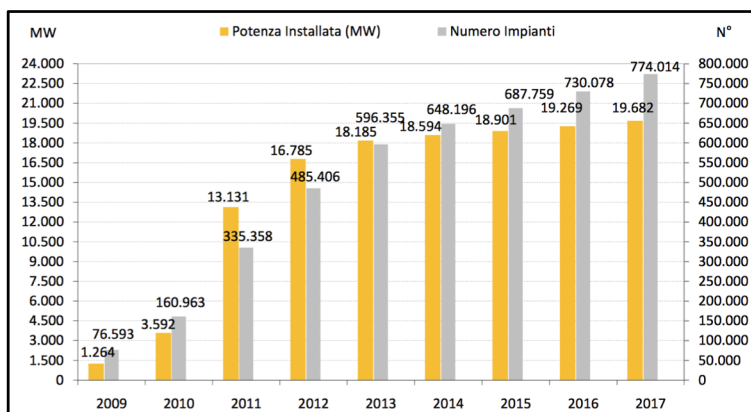
(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

13

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

| Classi di potenza (kW) | Installati nel 2016 | | Installati nel 2017 | |
|------------------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|
| | n° | MW | n° | MW |
| 1 <= P <= 3 | 17.175 | 43,9 | 17.160 | 43,4 |
| 3 < P <= 20 | 25.464 | 167,1 | 25.364 | 163,5 |
| 20 < P <= 200 | 1.558 | 105,5 | 1.280 | 89,7 |
| 200 < P <= 1.000 | 92 | 37,8 | 125 | 50,0 |
| 1.000 < P <= 5.000 | 4 | 8,1 | 2 | 3,9 |
| P > 5.000 | 1 | 20,0 | 5 | 63,1 |
| Totale | 44.294 | 382,4 | 43.936 | 413,6 |



| | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 |
|----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Taglia media cumulata (kW) | 16,0 | 22,2 | 38,7 | 34,7 | 30,5 | 28,7 | 27,4 | 26,4 | 25,4 |
| Taglia media annua (kW) | 18,7 | 27,6 | 54,7 | 24,4 | 12,6 | 7,9 | 7,7 | 8,7 | 9,4 |

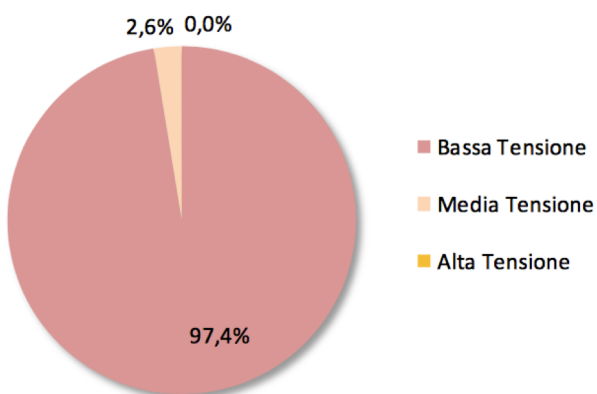
(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

14

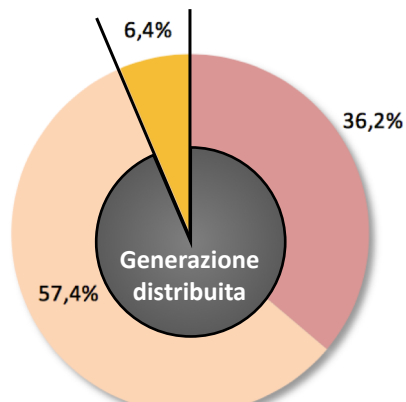
Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

Numero impianti a fine 2017 (%)



Potenza a fine 2017 (%)



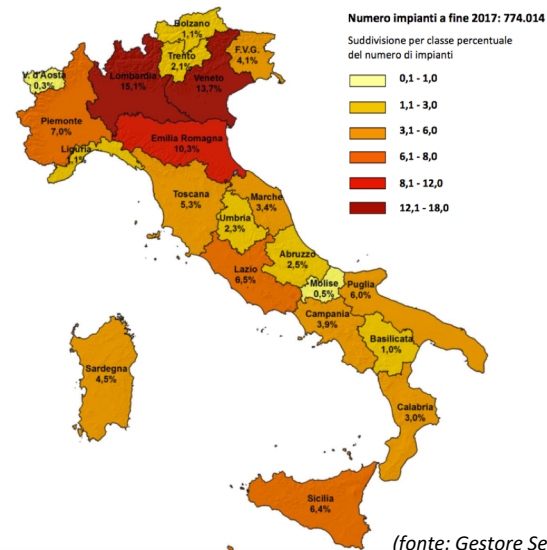
(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

15

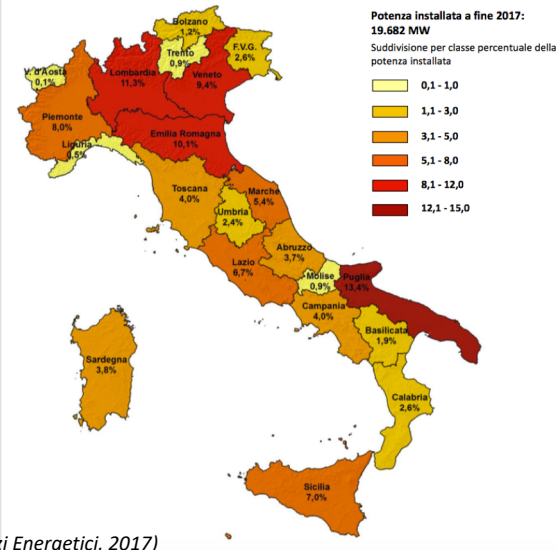
Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

Distribuzione regionale del numero degli impianti a fine 2017



Distribuzione regionale della potenza a fine 2017

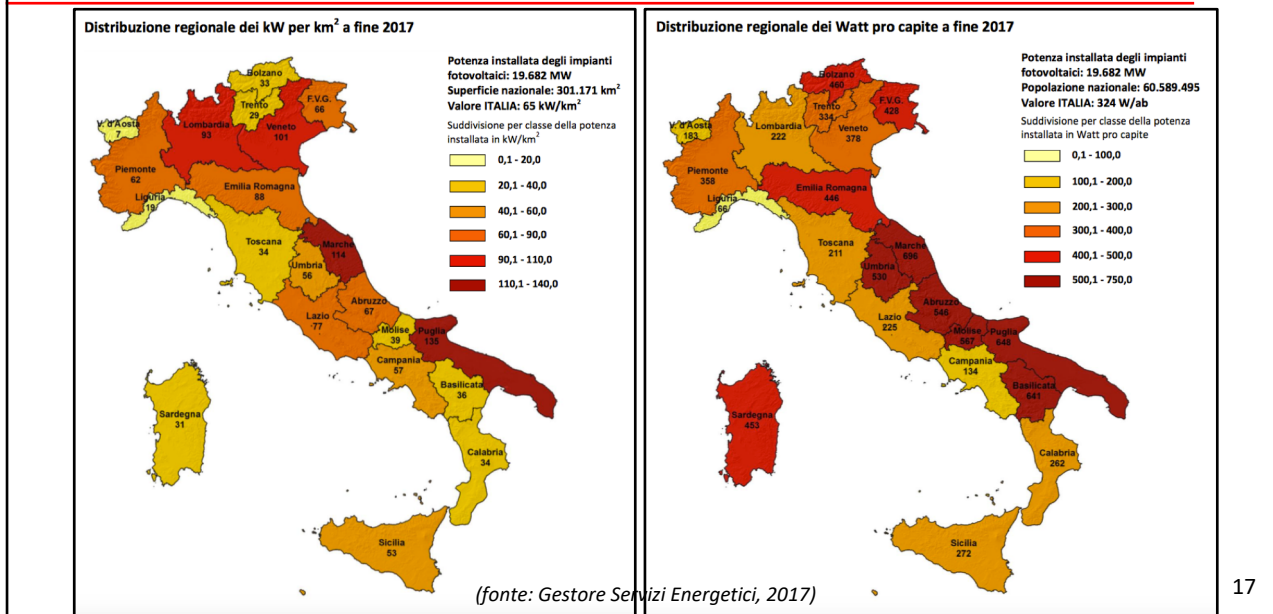


(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

16

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

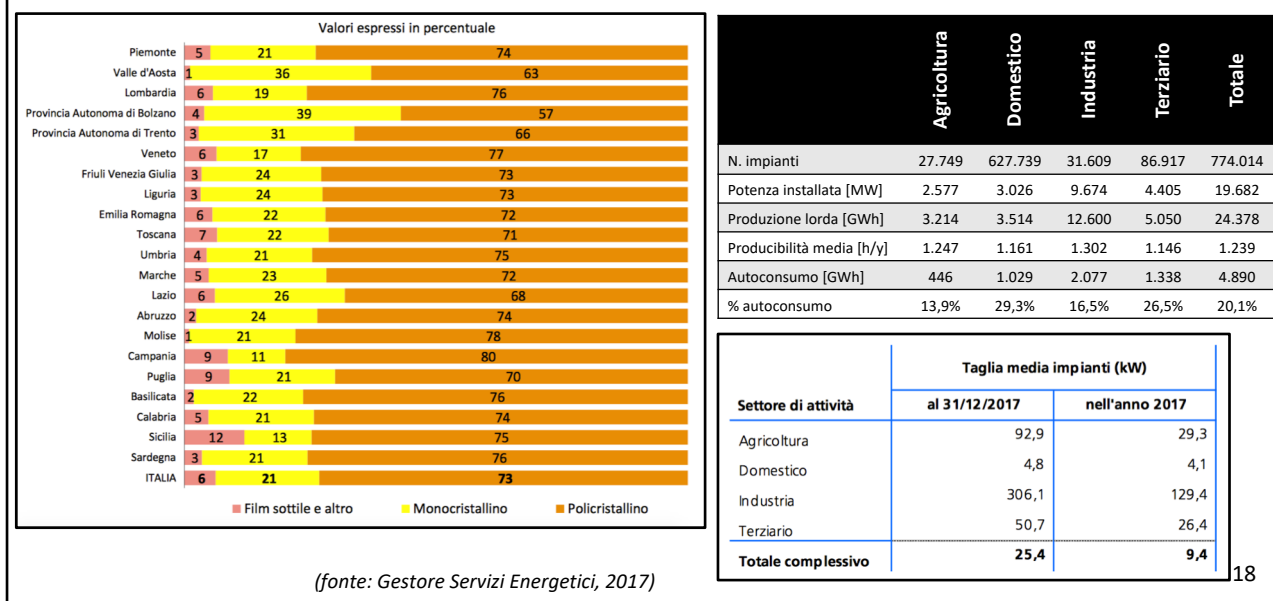
Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana



17

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

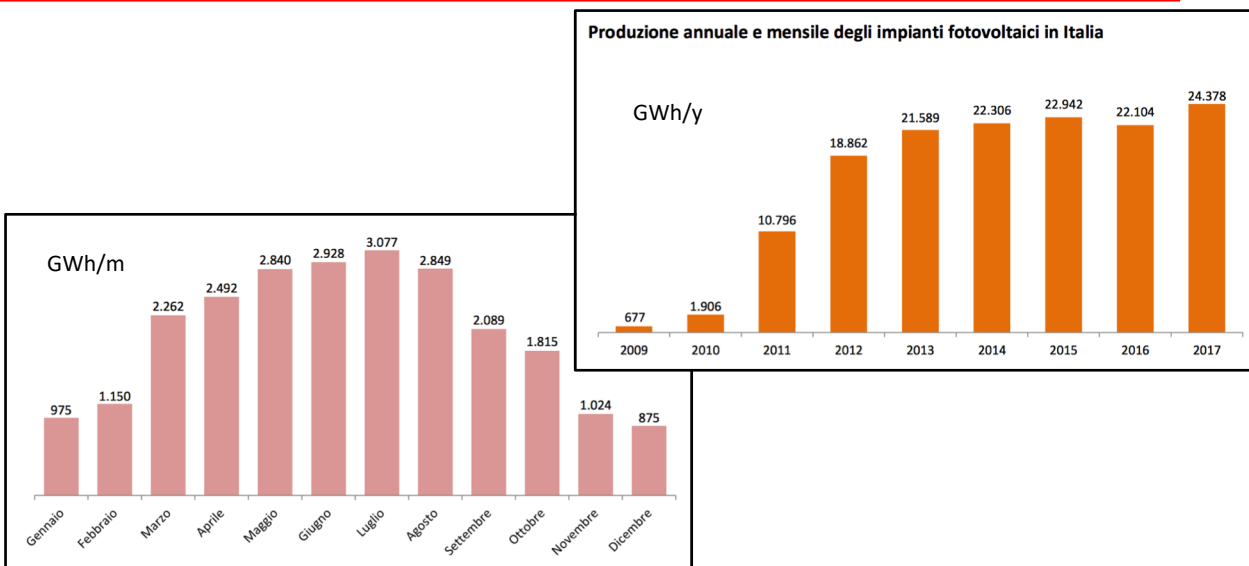
Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana



18

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

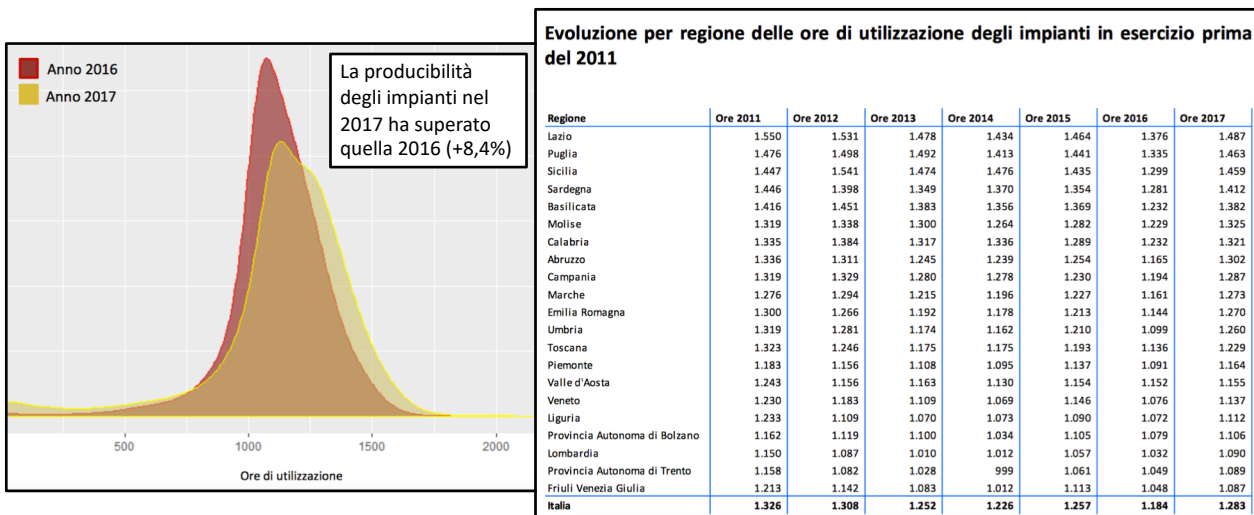
Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana



(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

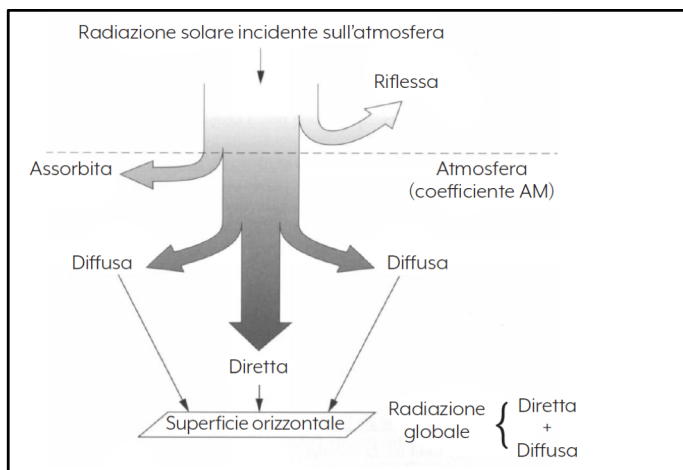


(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Irraggiamento solare

- Intensità dell'irraggiamento solare all'esterno dell'atmosfera: 1,353 kW/m² (costante solare)
- Riduzione per riflessione e parziale assorbimento di energia da parte dell'atmosfera
- **Irraggiamento convenzionale sulla superficie terrestre**, su piano ortogonale alla radiazione: 1,0 kW/m² (-26%)
 - A livello del mare
 - Condizioni meteorologiche favorevoli
 - A mezzogiorno
- L'irraggiamento è una potenza per unità di superficie
- L'irraggiamento è un valore integrale che considera le diverse lunghezze d'onda della luce solare



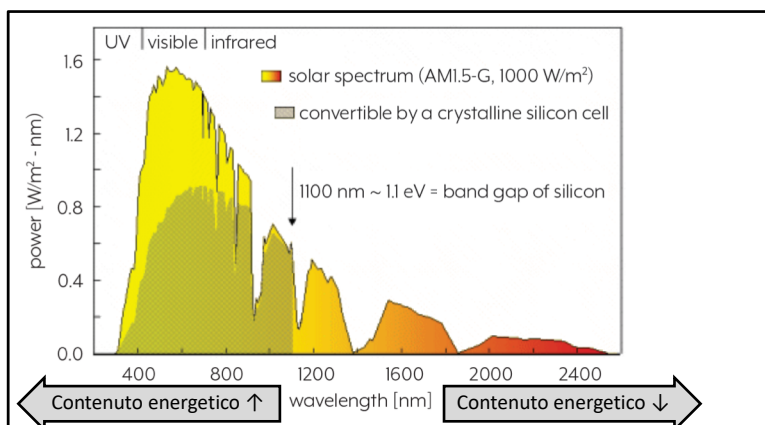
► Figura 5.1 Irraggiamento solare, componente diretta e componente diffusa.

21

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Irraggiamento solare

- L'irraggiamento è ripartito su uno spettro piuttosto ampio di lunghezze d'onda
 - Raggi ultravioletti (300 nm) → Radiazione infrarossa (circa 2.500 nm)
- Ogni tecnologia fotovoltaica è in grado di sfruttare in modo diverso specifiche bande di lunghezza d'onda
 - Es. silicio converte energia solare in elettrica per lunghezze d'onda inferiori a ~1.100 nm



► Figura 5.2 Spettro di radiazione solare disponibile alle latitudini europee, in funzione della lunghezza d'onda e nelle condizioni standard (1.000 W/m², spettro AM1,5).

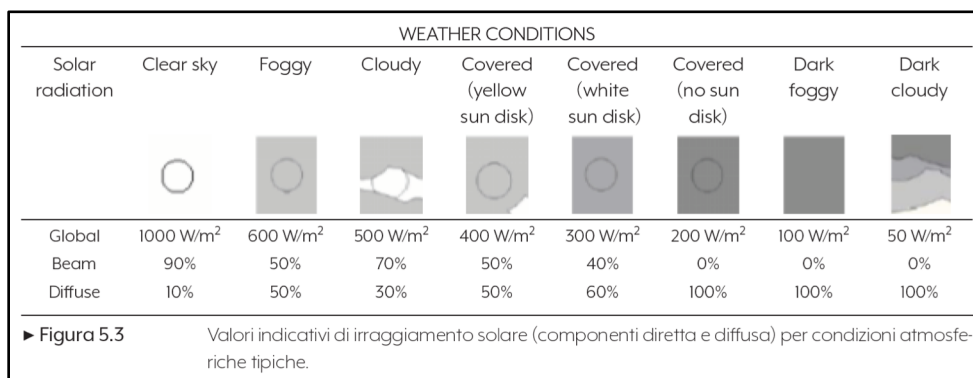
22

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Irraggiamento solare

- L'irraggiamento solare sulla superficie terrestre può essere suddiviso in tre componenti principali:
 - Radiazione diretta (beam component);
 - Radiazione diffusa dall'atmosfera (diffuse component);
 - Radiazione riflessa dal suolo/elementi adiacenti (coefficiente di albedo)
- Influenza delle condizioni meteo

Il comportamento dei pannelli cambia in modo significativo in funzione della tecnologia di conversione

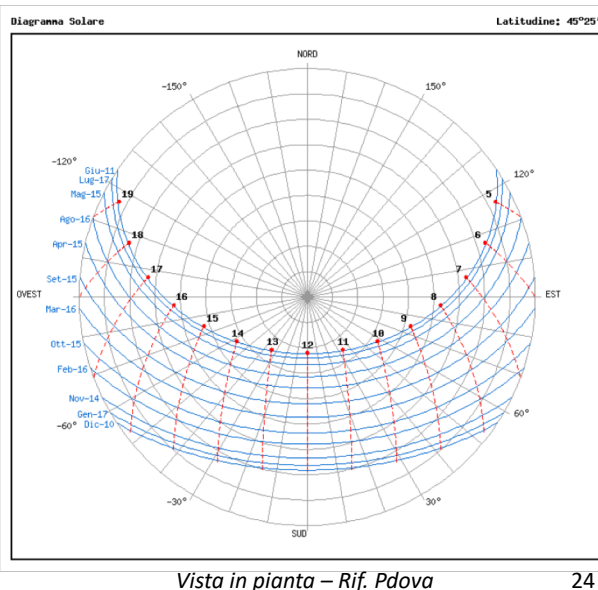


23

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Traiettorie solari

- Traiettorie solari: posizione del sole rispetto ad un punto generico della Terra. Elementi di influenza:
 - Luogo di osservazione (latitudine/longitudine)
 - Istante temporale
 - Variazioni giornaliere (giorno/notte)
 - Variazioni stagionali (estate/inverno)
 - Stagione
- Le traiettorie solari riportano graficamente:
 - Ora del giorno
 - Azimuth: proiezione sul piano orizzontale dell'angolo formato dalla direzione del raggio solare con la direttrice Nord-Sud
 - Elevazione: angolo formato dalla direzione del raggio solare rispetto al piano orizzontale, valutata sul piano verticale dove giace la direzione del raggio solare

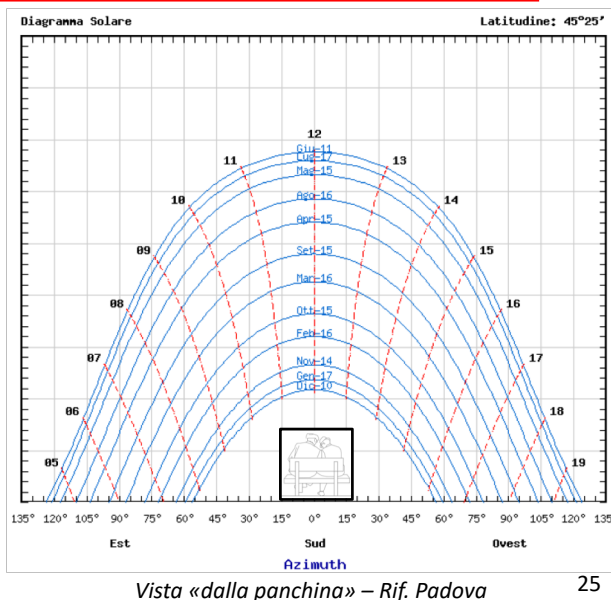


24

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Traiettorie solari

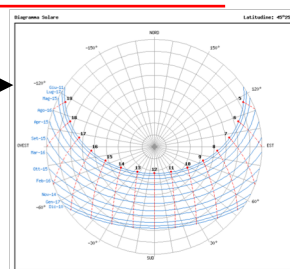
- **Traiettorie solari:** posizione del sole rispetto ad un punto generico della Terra. Elementi di influenza:
 - Luogo di osservazione (latitudine/longitudine)
 - Istante temporale
 - Variazioni giornaliere (giorno/notte)
 - Variazioni stagionali (estate/inverno)
 - Stagione
- Le traiettorie solari riportano graficamente:
 - Ora del giorno
 - Azimuth: proiezione sul piano orizzontale dell'angolo formato dalla direzione del raggio solare con la direttrice Nord-Sud
 - Elevazione: angolo formato dalla direzione del raggio solare rispetto al piano orizzontale, valutata sul piano verticale dove giace la direzione del raggio solare



Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Traiettorie solari

- Le traiettorie solari sono sostanzialmente diverse in funzione del luogo di analisi
 - Italia:
 - Il sole sorge in direzione est (N-E nei mesi estivi, S-E nei mesi invernali)
 - Transita in direzione sud
 - Tramonta in direzione ovest (N-O nei mesi estivi, S-O nei mesi invernali)
 - A ridosso dell'equatore (es. Tanzania)
 - La radiazione solare può arrivare da nord o da sud a seconda delle stagioni dell'anno
- **Perché è fondamentale studiare le traiettorie solari?**
 - Scelta della tipologia di impianto (fisso oppure a inseguimento, es. monoassiale, biassiale, ecc.)
 - Scelta della tecnologia di conversione (materiale fotovoltaico, tipo di celle, impianti a concentrazione)
 - Dimensionamento meccanico ed elettrico dell'impianto
 - Integrazione dell'irraggiamento incidente al variare delle condizioni di esposizione
 - Stima dell'energia primaria complessiva che incide su una superficie di osservazione in un periodo prefissato (es. un giorno, un mese, un anno)
 - Producibilità dell'impianto e suo ritorno economico



26

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Radiazione solare

- La **radiazione solare** è l'energia incidente su una superficie orizzontale con area unitaria, in un determinato intervallo temporale T [Wh/m²]
- In altre parole, la radiazione solare è l'integrale dell'irraggiamento nell'intervallo temporale T, valutato su una superficie orizzontale unitaria
- Elementi di influenza:
 - Aspetti macroscopici (latitudine/longitudine)
 - Fenomeni locali (clima)
 - Orografia adiacente al punto di osservazione
 - Effetti detrattivi (possibili ombreggiamenti)
 - Aspetti incrementali (possibili riflessioni)



27

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Radiazione solare (PV-GIS)

- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

28

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Radiazione solare (PV-GIS)

- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

29

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Radiazione solare (PV-GIS)

- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>
- **Dati di input:**
 - **Caratterizzazione del sito:**
 - Coordinate geografiche (latitudine e longitudine)
 - Presenza di ostacoli (profilo clinometrico delle ombre)
 - Tipologia delle aree adiacenti per la valutazione dell'energia riflessa (albedo)
 - **Altri input:**
 - Dati caratteristici dell'impianto fotovoltaico (tecnologia fotovoltaica, potenza nominale dell'impianto e efficienza stimata a valle della conversione fotovoltaica)
 - Caratteristiche di esposizione della superficie fotovoltaica (moduli orizzontali o con orientazione e inclinazione qualsiasi, oltre che sistemi a inseguimento biassiale)
- **Output** (ad esempio):
 - Andamento mensile della radiazione giornaliera in condizioni di cielo sereno (clear-sky)
 - Andamento mensile della radiazione globale giornaliera media (considerando fenomeni meteorologici)
 - Profili clinometrici in diversi giorni caratteristici dell'anno
 - Andamento giornaliero della radiazione solare quattoraria

30

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Fonte primaria – Radiazione solare (PV-GIS)

- <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>

Performance of Grid-connected PV

NOTE: before using these calculations for anything serious, you should read [this](#)

PVGIS estimates of solar electricity generation

Location: 45°24'23" North, 11°52'36" East, Elevation: 23 m a.s.l.,

Solar radiation database used: PVGIS-CMSAF

Nominal power of the PV system: 1.0 kW (crystalline silicon)
 Estimated losses due to temperature and low irradiance: 10.0% (using local ambient temperature)
 Estimated loss due to angular reflectance effects: 2.8%
 Other losses (cables, inverter etc.): 14.0%
 Combined PV system losses: 24.8%

Fixed system: inclination=36°, orientation=0°

| Month | E_d | E_m | H_d | H_m |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Jan | 1.74 | 53.9 | 2.12 | 65.7 |
| Feb | 2.96 | 82.8 | 3.65 | 102 |
| Mar | 3.82 | 118 | 4.94 | 153 |
| Apr | 4.13 | 124 | 5.47 | 164 |
| May | 4.52 | 140 | 6.12 | 190 |
| Jun | 4.58 | 138 | 6.36 | 191 |
| Jul | 4.89 | 152 | 6.86 | 213 |
| Aug | 4.54 | 141 | 6.34 | 197 |
| Sep | 3.94 | 118 | 5.36 | 161 |
| Oct | 2.88 | 89.4 | 3.75 | 116 |
| Nov | 1.93 | 58.0 | 2.44 | 73.1 |
| Dec | 1.72 | 53.4 | 2.10 | 65.2 |
| Yearly average | 3.47 | 106 | 4.63 | 141 |
| Total for year | | 1270 | | 1690 |

Stima delle perdite per temperatura e per riflessione

- E_d : Average daily electricity production from the given system (kWh)
- E_m : Average monthly electricity production from the given system (kWh)
- H_d : Average daily sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)
- H_m : Average sum of global irradiation per square meter received by the modules of the given system (kWh/m²)

Altri output: valutazioni preliminari in merito al corretto dimensionamento di sistemi in isola alimentati da un impianto fotovoltaico abbinato a un sistema di accumulo

31

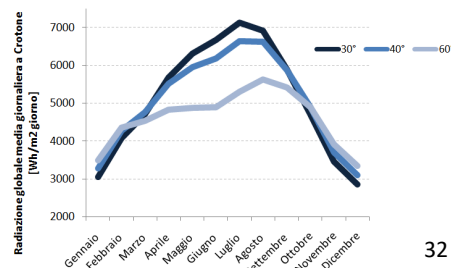
Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Obiettivo della progettazione dell'impianto

- Possono essere perseguiti diversi obiettivi:
 - Massimizzare l'energia prodotta annualmente**
 - Nel caso italiano → Orientazione Sud e angoli di tilt nell'intervallo 25-35°, direttamente dipendenti dalla latitudine di installazione
 - Ottenere un **andamento specifico della produzione fotovoltaica su base mensile**
 - Esempio: massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta
 - Approccio tipico nel dimensionamento degli impianti in isola (ovvero scollegati dalla rete elettrica), al fine di ridurre la taglia del sistema di accumulo abbinato
 - Nel caso italiano → Aumento dell'inclinazione dei pannelli al fine di aumentare la produzione invernale a discapito di quella estiva (similarmente ai pannelli solari termici)

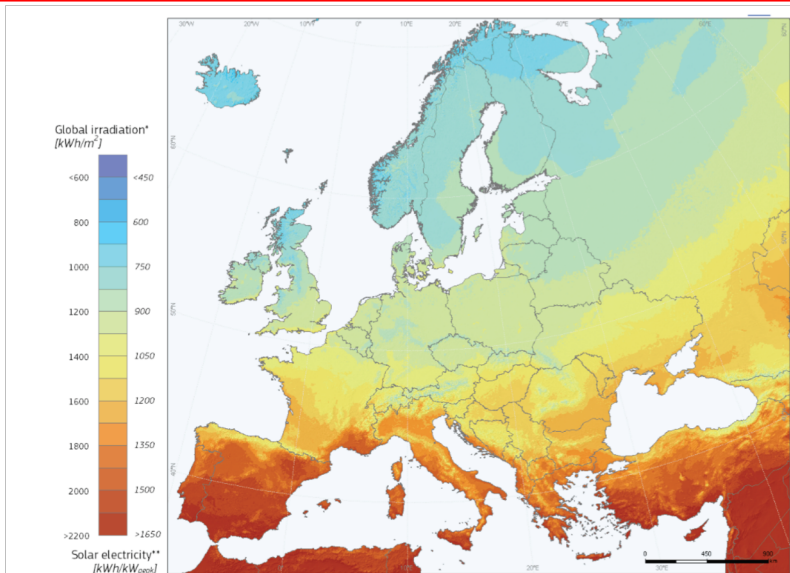
| Esposizione Sud | 30° | 40° | 60° |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|
| Gennaio | 3053 | 3283 | 3495 |
| Febbraio | 4079 | 4278 | 4359 |
| Marzo | 4715 | 4765 | 4532 |
| Aprile | 5668 | 5507 | 4828 |
| Maggio | 6320 | 5950 | 4876 |
| Giugno | 6676 | 6189 | 4898 |
| Luglio | 7120 | 6635 | 5298 |
| Agosto | 6908 | 6623 | 5624 |
| Settembre | 5882 | 5868 | 5423 |
| Ottobre | 4705 | 4890 | 4898 |
| Novembre | 3460 | 3705 | 3910 |
| Dicembre | 2856 | 3096 | 3338 |
| Anno | 5125 | 5069 | 4624 |

Valori di radiazione globale media giornaliera a Crotone [Wh/m² giorno]



Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Mapa della radiazione solare incidente



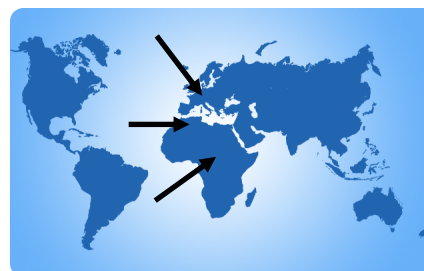
Mapa della radiazione solare su superficie orizzontale (range 600 - 2.000 kWh/m²)

► Figura 5.5 Mapa della radiazione solare annua a livello europeo. Fonte: PVGIS.

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

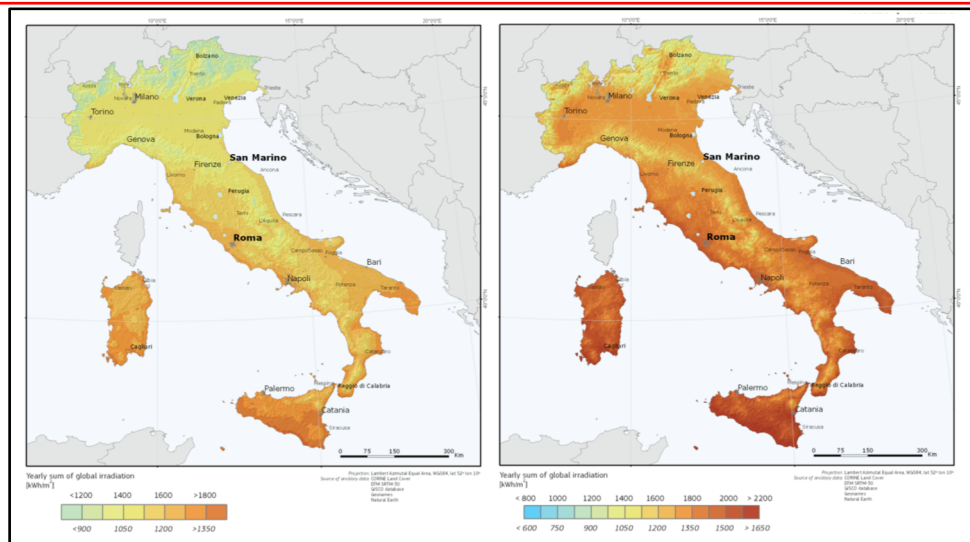
Mapa della radiazione solare incidente

| Mese | Europa continentale | | Nord Africa | | Africa centrale | |
|----------------|--|---|--|---|--|--|
| | Superficie orizzontale [kWh/m ²] | Tilt ottimale (36°) [kWh/m ²] | Superficie orizzontale [kWh/m ²] | Tilt ottimale (28°) [kWh/m ²] | Superficie orizzontale [kWh/m ²] | Tilt ottimale (7°) [kWh/m ²] |
| Gennaio | 29 | 46 | 109 | 156 | 178 | 187 |
| Febbraio | 47 | 70 | 123 | 159 | 157 | 161 |
| Marzo | 97 | 124 | 191 | 220 | 183 | 184 |
| Aprile | 132 | 149 | 201 | 207 | 160 | 157 |
| Maggio | 155 | 156 | 233 | 220 | 157 | 152 |
| Giugno | 162 | 156 | 244 | 218 | 135 | 130 |
| Luglio | 168 | 166 | 246 | 225 | 131 | 127 |
| Agosto | 143 | 155 | 228 | 226 | 127 | 125 |
| Settembre | 99 | 120 | 192 | 212 | 134 | 133 |
| Ottobre | 66 | 92 | 164 | 204 | 144 | 146 |
| Novembre | 35 | 55 | 119 | 166 | 150 | 155 |
| Dicembre | 25 | 43 | 103 | 152 | 174 | 183 |
| Mese medio | 97 | 111 (+15%) | 179 | 197 (+10%) | 153 | 153 (+0%) |
| Totale annuale | 1.160 | 1.330 | 2.150 | 2.370 | 1.830 | 1.840 |



► Tabella 5.1 Andamento della radiazione solare su piano orizzontale e sul piano con inclinazione tale da massimizzare la radiazione solare annuale, per 3 località a diverse latitudini.

Mappa della radiazione solare incidente

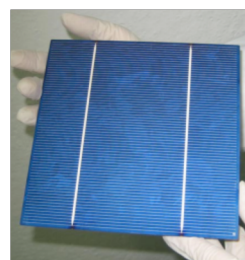
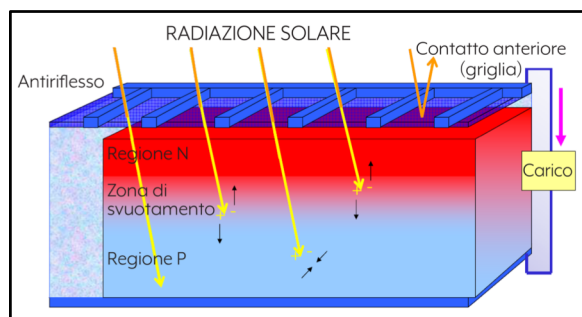


► Figura 5.6 Confronto tra la radiazione solare annua su superficie orizzontale (a) e su superficie inclinata tale da massimizzare tale parametro (b). Fonte: PVGIS.

35

Cella fotovoltaica

- Nelle applicazioni terrestri la cella fotovoltaica tipicamente utilizzata è formata da una **giunzione p-n**
 - Regione drogata P nella parte posteriore (anodo)
 - Regione drogata N nella parte anteriore esposta alla radiazione (catodo)
- Spessore totale delle celle circa 130-200 μm
- Principale tecnologia è silicio cristallino (circa 5/6 del mercato mondiale)
- **Modellazione elettrica:**
 - Foto-diode che, esposto alla radiazione solare, genera una corrente direttamente proporzionale all'irraggiamento incidente
- Nelle applicazioni spaziali si utilizzano celle basate su altri materiali o con struttura multigiunzione per incrementare il rendimento di conversione fotovoltaica

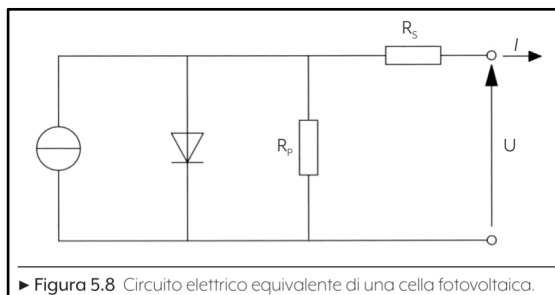


36

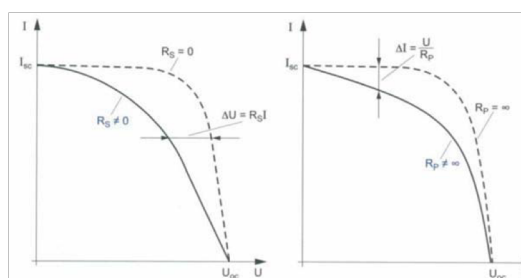
Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Modello elettrico

- **Circuito equivalente complessivo di una cella:**
 - **Sorgente ideale di corrente** → Generazione di corrente proporzionale all'irraggiamento incidente
 - **Diodo in parallelo** → Modellazione del comportamento a vuoto (tensione a vuoto)
 - **Resistenze equivalenti** R_p ed R_s → Andamento della curva tensione-corrente di cella
- Presenza di un elemento non lineare nel modello equivalente → Non possibile applicare la sovrapposizione degli effetti nello studio del comportamento della sezione DC di un generatore fotovoltaico



► Figura 5.8 Circuito elettrico equivalente di una cella fotovoltaica.

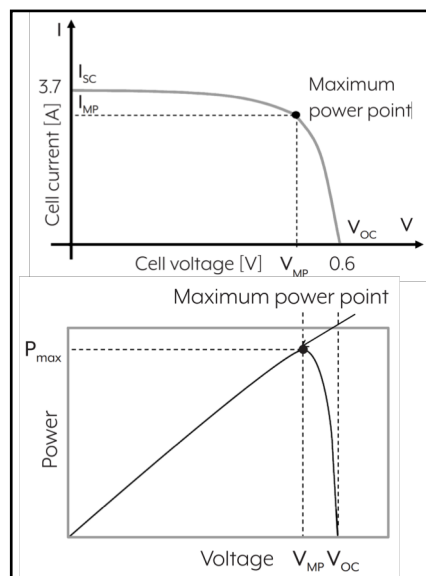


37

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Curva di funzionamento

- La curva di funzionamento è solitamente riferita alle **Standard Test Conditions (STC)**
 - Irraggiamento 1.000 W/m^2
 - Temperatura di cella 25°C
 - Spettro luminoso AM1,5
- La **curva caratteristica di funzionamento di una cella fotovoltaica**
 - Nel piano tensione-corrente (V-I)
 - Nel piano tensione-potenza (V-P)
- A **circuito aperto**, la corrente generata internamente si richiude sul diodo equivalente → Tensione a vuoto V_{oc}
- In **condizioni di cortocircuito**, il diodo viene by-passato → L'intera corrente generata I_{sc} circola nel circuito esterno
- La curva P-V avrà un massimo positivo, che prende il nome di **Maximum Power Point (MPP)** → P_{MP} o P_{max}



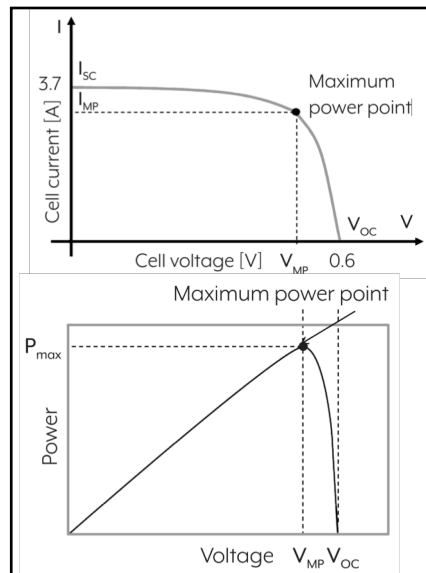
38

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Curva di funzionamento

- La cella lavora al suo punto di massima potenza grossomodo quando il carico equivalente applicato è pari al rapporto $V_{OC}/I_{SC} \cong V_{MP}/I_{MP}$
- Viene definito il parametro rappresentativo **Fill factor** (o fattore di riempimento) pari a

$$(V_{MP} I_{MP}) / (V_{OC} I_{SC})$$
- Al crescere del fill factor, la curva I-V si avvicina sempre più al rettangolo definito dagli assi, dall'ascissa V_{OC} e dall'ordinata I_{SC}
 - Al crescere del Fill Factor è più facile individuare il punto di funzionamento MPP

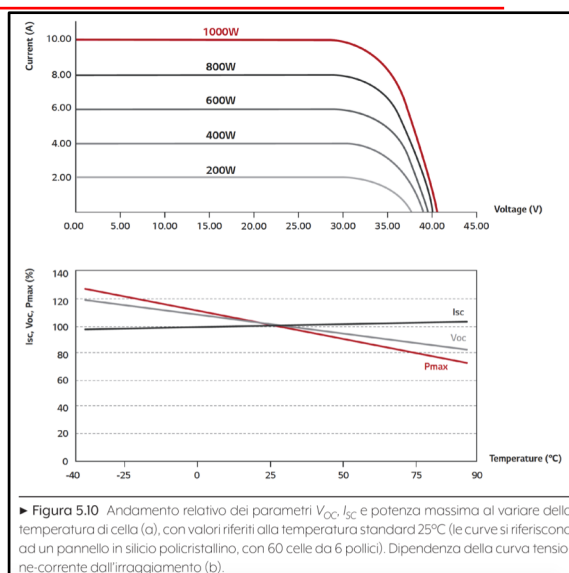


39

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Curva di funzionamento

- La curva reale di funzionamento varia anche sensibilmente nelle condizioni operative reali:
 - All'aumentare della **temperatura**, $V_{OC} \downarrow \downarrow$, $I_{SC} \uparrow$, quindi $P_{max} \downarrow$
 - La dipendenza potenza-temperatura è negativa, in modulo pari a circa 0,3-0,5%/°C
 - Al diminuire dell'**irraggiamento**, la tensione cala di poco e la corrente di cortocircuito si riduce pressoché linearmente
 - La potenza erogata dalla cella non dipende linearmente dall'irraggiamento incidente
 - L'irraggiamento che incide ortogonalmente sulla superficie fotovoltaica è minore del valore standard STC (1.000 W/m²) per la maggior parte del tempo
 - Il comportamento a basso irraggiamento è importante nello studio della producibilità



► Figura 5.10 Andamento relativo dei parametri V_{OC} , I_{SC} e potenza massima al variare della temperatura di cella (a), con valori riferiti alla temperatura standard 25°C (le curve si riferiscono ad un pannello in silicio policristallino, con 60 celle da 6 pollici). Dipendenza della curva tensione-corrente dall'irraggiamento (b).

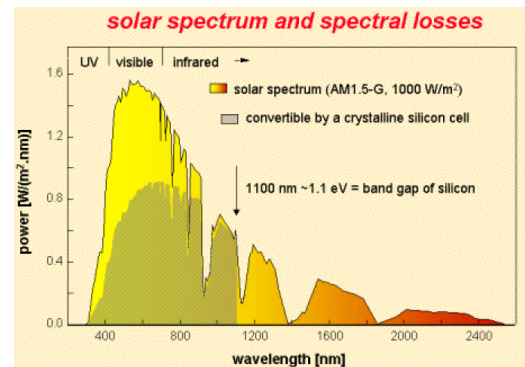
40

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Rendimento di conversione

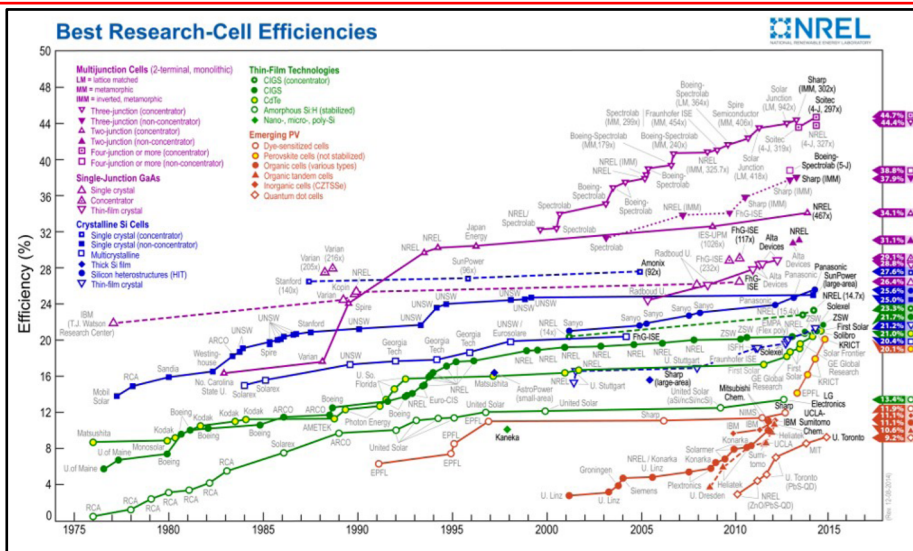
- Il **rendimento di conversione** è definito come rapporto tra la potenza di uscita P_{MP} (elettrica, nel punto MPP) e la potenza solare in ingresso P_{in} (irraggiamento complessivo I sull'area A della cella)
- Le cause principali che riducono il valore di rendimento sono (valori per celle in silicio cristallino):
 - **Riflessione** sulla superficie della cella e **ombreggiamento** causato dai contatti frontali (circa 3%)
 - **Radiazione luminosa con insufficiente quantitativo energetico** (lunghezza d'onda troppo lunga) per attivare la conversione fotovoltaica (circa 22%)
 - **Radiazione luminosa con eccessivo quantitativo energetico** (lunghezza d'onda corta, ma eccessivo contenuto energetico, circa 22%)
 - Perdita per **ricombinazione** (circa 7,5%)
 - Perdita di gradiente elettrico nella cella (circa 19%)
 - Perdite di **conduzione** (resistenza serie, circa 0,5%)

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{I A}$$

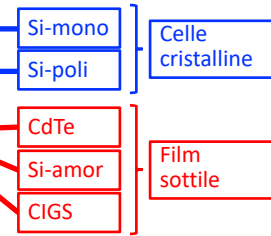


Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Cella fotovoltaica – Rendimento di conversione



- Applicazioni terrestri → Rendimento nominale compreso tra qualche punto percentuale (es. Si amorfo) e 22-23% (silicio monocristallino ad alta efficienza)

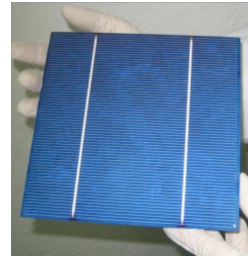


► Figura 5.11 Evoluzione dell'efficienza di conversione delle diverse tecnologie di celle solari negli ultimi quarant'anni. Fonte: NREL.

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici

- Ogni cella ha la potenza nominale di alcuni Watt
 - Valori di irraggiamento incidente in condizioni standard (STC, 1.000 W/m²)
 - Valori tipici di rendimento di conversione fotovoltaica
 - Dimensioni tipiche delle celle, legate a vincoli nel processo di fabbricazione (celle grossomodo quadrate con lato pari a 5", 6" o 8" per il silicio cristallino) → Limitazione dell'area di captazione A
- È necessario proteggere le celle:
 - Azioni esterne di tipo meccanico, termico e chimico
- È necessario garantire la sicurezza elettrica degli utenti attraverso un opportuno livello di isolamento
 - Solitamente i pannelli fotovoltaici hanno isolamento di classe 2 → Non richiedono la connessione esplicita all'impianto di terra

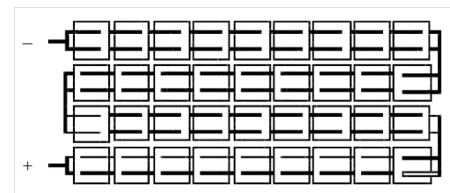
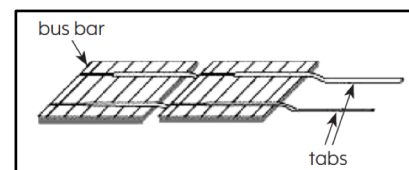


43

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici

- I pannelli fotovoltaici sono costituiti da più celle, generalmente collegate in serie al fine di aumentare la potenza complessiva del pannello senza aumentare la corrente nominale di pannello (perdite Joule)
 - Realizzazioni particolari se si vuole aumentare la potenza del pannello senza incrementare eccessivamente la tensione di pannello
- Collegamento in serie tramite lamine sottili di materiale conduttore
 - Collegamento elettrico tra la superficie superiore di una cella con la superficie inferiore della cella adiacente
- I pannelli standard per applicazioni terrestri hanno numero di celle nel range 48 – 96 (anche in funzione della dimensione di cella)
- Le celle sono collegate in serie con un percorso a serpentina:
 - Minimizza la lunghezza dei percorsi, ovvero le perdite ohmiche
 - Consente di escludere alcune file tramite diodi di bypass

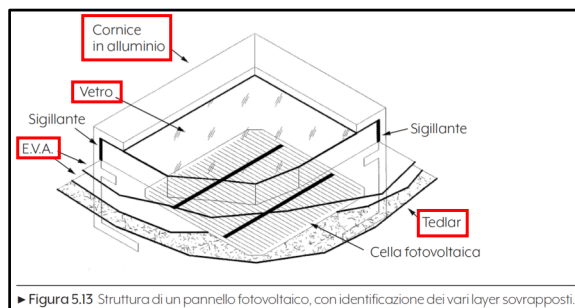


44

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici

- Le celle, tra loro elettricamente collegate, sono incapsulate all'interno di una struttura a strati:
 - Rigidità e protezione meccanica:**
 - Vetro anteriore (spessore 3-4 mm)
 - Cornice perimetrale in alluminio
 - Incapsulamento** tra due strati polimerici di etilene vinil acetato (EVA)
 - Impedire il movimento delle celle
 - Proteggere dai contatti diretti
 - Evitare la formazione di bolle d'aria che potrebbe dare origine a fenomeni locali di micro-scariche (processo di laminazione a circa 150°C e in condizioni di forte depressione)
 - Strato posteriore (**back-sheet**), con funzione di isolante elettrico e di barriera per umidità e corrosione
 - Generalmente non trasparente trattandosi del lato non illuminato → Foglio in materiale plastico (es. Tedlar-poliestere)
 - Vetro per pannelli semi-trasparenti o per alcune tecnologie (es. CdTe) → Aggravio di costi e peso del pannello

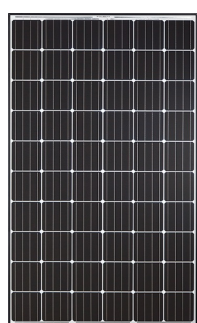


► Figura 5.13 Struttura di un pannello fotovoltaico, con identificazione dei vari layer sovrapposti.

45

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici

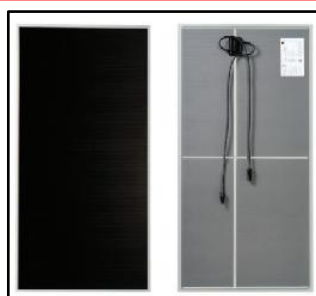


Silicio monocristallino (Si-mono, standard)



Silicio policristallino (Si-poli, standard)

Silicio cristallino (circa 5/6 del mercato mondiale)



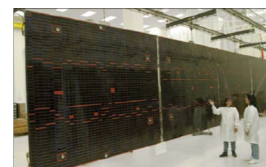
CdTe



CIGS (copper indium gallium (di) selenide)



Silicio amorfo



Pannelli multi-giunzione per applicazioni aerospaziali

46

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

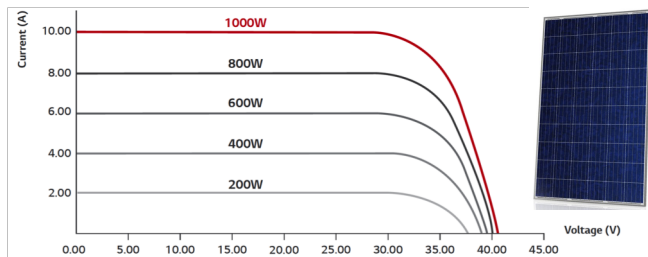
Pannelli fotovoltaici – Caratteristiche elettriche

- Collegamento interno delle celle → Caratteristiche elettriche dei pannelli fotovoltaici
- In prima battuta, nota la caratteristica V-I della cella, per determinare la caratteristica V-I del pannello fotovoltaico si considera che:
 - Tecnologia di conversione → Tensione a vuoto di singola cella, circa 0,65 V per Si-poli
 - Asse orizzontale (V) moltiplicato per il numero di celle in serie
 - Tecnologia di conversione → Densità di corrente di cortocircuito in (A/cm²), circa 40 mA/cm² per Si-poli
 - La dimensione della cella influenza I_{SC}
 - Asse verticale (I) moltiplicato per il numero di percorsi interni in parallelo

Esempio: pannello standard in silicio cristallino, 60 celle con lato da 6" connesse in serie

Le caratteristiche nominali, ovvero riferite alle condizioni standard STC sono:

- Corrente di cortocircuito di pannello intorno a 10 A (singolo percorso interno)
- Tensione a vuoto nell'ordine dei 40 V (60 celle in serie)



47

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici – Caratteristiche elettriche

- Modificando le condizioni di lavoro rispetto a quelle standard, la variazione dei parametri elettrici del pannello è simile a quella vista per la singola cella
- La potenza generata (e quindi il rendimento di conversione) dipendono dalla **temperatura** secondo il coefficiente γ (<0), in [%/°C]
 - Valori tipici di γ sono nell'intervallo da -0,50 %/°C a -0,30 %/°C in funzione della tecnologia di conversione
 - In installazioni con temperature di lavoro previste molto elevate, la scelta del tipo di pannello può considerare anche questo aspetto
- È possibile affermare che grossomodo il pannello fotovoltaico riduce la propria potenza nominale di circa il **4-4,5% per ogni 10°C di sovratemperatura** rispetto alle condizioni standard
 - È necessario prevedere una opportuna ventilazione del pannello, ove possibile
- Il picco di potenza generata si registra nei mesi primaverili/autunnali:
 - Radiazione ortogonale alla superficie fotovoltaica (inclinazione dei raggi e angolo di tilt dei pannelli)
 - Temperatura di cella inferiore
 - Elevata probabilità di precipitazioni atmosferiche → Effetto pulente della superficie vetrata
- La massima produzione elettrica giornaliera si registra nei mesi estivi (più ore di luce)

48

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

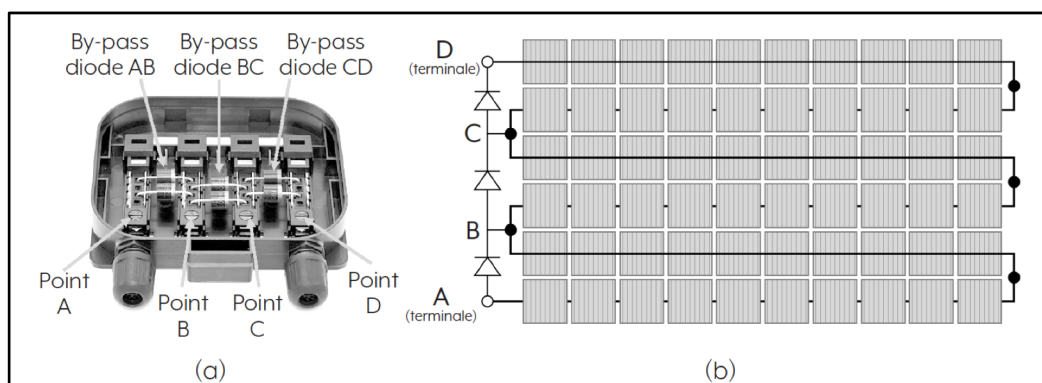
Pannelli fotovoltaici – Diodi di by-pass

- L'esposizione del pannello deve essere il più possibile omogenea
 - Irraggiamento → Corrente generata dalla cella
 - Le celle collegate in serie devono essere percorse dallo stesso valore di corrente (legge di Kirchhoff)
- Qualora alcune celle siano ombreggiate, esse riducono il loro valore di corrente generata
 - Diventano un collo di bottiglia per il passaggio di corrente nell'intero modulo
- Può accadere che la cella ombreggiata lavori in condizioni inverse (tensione inversa), fungendo da carico per le restanti celle del pannello
 - Abbassamento del rendimento del pannello (e dell'intera stringa composta dai pannelli in serie)
 - La cella ombreggiata potrebbe essere soggetta ad un riscaldamento localizzato (hot spot)
 - Danneggiamento significativo (deterioramento dell'isolamento elettrico, innesco di incendio)
- Per limitare le conseguenze legate all'ombreggiamento di alcune celle, sono inseriti nei pannelli dei diodi di by-pass
 - I diodi di by-pass cortocircuitano un gruppo di celle in caso di loro parziale o completo ombreggiamento
 - Anche la disposizione dei pannelli dovrà considerare le aree ombreggiabili e di conseguenza massimizzare i benefici conseguibili con i diodi di by-pass

49

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Pannelli fotovoltaici – Diodi di by-pass



► **Figura 5.14** Esempio di Junction Box con indicazione dei diodi di by-pass integrati (a) e schema circuitale tipico di un pannello con 6 file di celle (es. 48-54-60-72 celle) e 3 diodi di by-pass (b).

- Schemi di connessione diversi sono possibili, soprattutto nel caso di pannelli realizzati ad-hoc oppure con un numero di celle molto elevato rispetto allo standard

50

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Collegamento dei pannelli

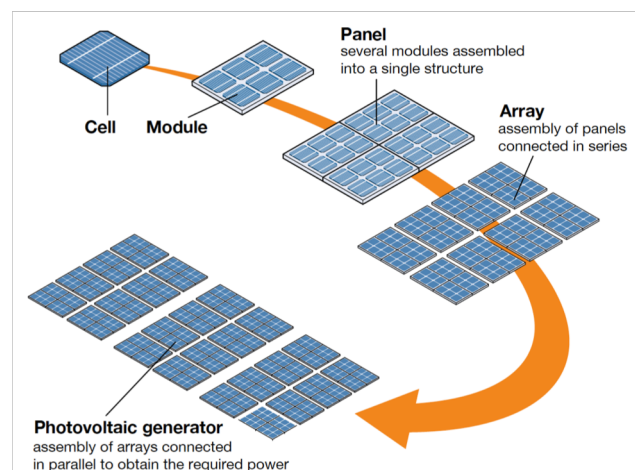
- Per esigenze dimensionali e logistiche, i pannelli non superano generalmente qualche centinaio di Watt di potenza nominale (superficie di 1,5 – 2 m² in relazione alla tecnologia fotovoltaica impiegata)
- Impianti fotovoltaici di grande taglia → Molti pannelli fotovoltaici
- **Come connettere tra loro i pannelli fotovoltaici?**
 - **Corrente:**
 - Il costo dei componenti (cavi, interruttori, fusibili, ecc.) dipende dalla corrente circolante
 - Le perdite per effetto Joule dipendono da I²
 - A parità di potenza, è opportuno ridurre quanto possibile la corrente circolante
 - **Tensione:**
 - La massima tensione di sistema è vincolata:
 - Dalle caratteristiche nominali dei componenti di impianto a valle del campo fotovoltaico (es. tensione di tenuta dei cavi, tensione nominale dei dispositivi di sezionamento e protezione, tensione massima ai morsetti di ingresso del convertitore statico)
 - Dalla tensione massima di sistema sopportabile dai pannelli fotovoltaici stessi
 - Criteri legati alla sicurezza elettrica e al rischio incendio (sicurezza del personale VVF)

51

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Collegamento dei pannelli

- I pannelli in primis sono connessi in serie a formare delle stringhe (o array)
 - Tensione tipicamente applicabile ($V_{max,DC}$ intorno a 1.000 V) → Potenza complessiva delle stringhe fotovoltaiche di alcuni kW
- Per aumentare ulteriormente la potenza complessiva di impianto, è necessario connettere in parallelo più stringhe
 - Sul lato DC del convertitore statico oppure
 - Tramite opportune cassette di parallelo sparse nell'impianto
 - Necessari alcuni accorgimenti per evitare perdite di efficienza del campo fotovoltaico (es. diodi di blocco o altre protezioni contro l'inversione della corrente di stringa)
- **Più unità inverter** possono essere connesse in parallelo sul lato AC



52

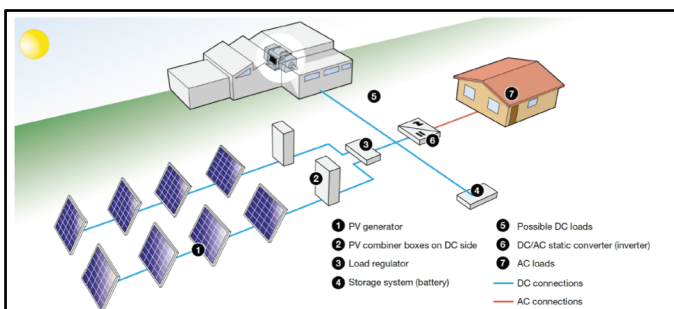
Tipologie di impianti fotovoltaici

- In relazione allo stato dell'impianto rispetto alla rete pubblica, se disponibile, si hanno:
 - **Impianti in isola** (off-grid e stand-alone)
 - La fonte solare può essere combinata con altri impianti di generazione e/o di accumulo per garantire la continuità di alimentazione alle utenze
 - Questi sistemi operano in assenza di rete elettrica pubblica per una durata molto estesa o addirittura permanentemente
 - Applicazioni elementari a basso costo (es. pompe per acqua potabile in aree isolate) e installazioni più complesse e raffinate
 - Soluzioni tecniche per l'elettificazione in aree in via di sviluppo, alternativi ai gruppi di generazione a fonte fossile (limitazione di emissioni, rumore e problemi di approvvigionamento del combustibile)
 - 1,2 M persone non ha accesso all'energia elettrica (16% della popolazione mondiale)
 - Applicazioni tipiche: alimentazione di sistemi di pompaggio dell'acqua, ripetitori radio, stazioni di osservazione meteorologica o sismica, stazioni di trasmissione dati, sistemi di segnaletica stradale, portuale e aeroportuale, fornitura di servizi nei camper, impianti pubblicitari, rifugi ad alta quota, elettificazione rurale di aree non servite dalla rete elettrica principale, sistemi di backup in caso di frequenti interruzioni della continuità del servizio

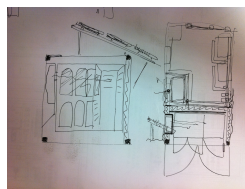
53

Tipologie di impianti fotovoltaici

- In relazione allo stato dell'impianto rispetto alla rete pubblica, se disponibile, si hanno:
 - **Impianti in isola** (off-grid e stand-alone)



► Figura 5.16 Esempio di schema elettrico di massima di un impianto di media potenza per l'alimentazione in isola di un carico locale, in abbinamento con un sistema di accumulo. Fonte: ABB Quaderni di applicazione tecnica N.10 – Impianti fotovoltaici.



54

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Tipologie di impianti fotovoltaici

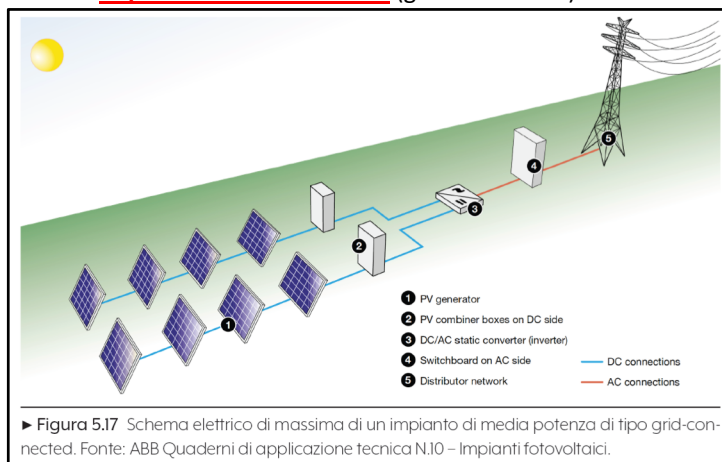
- In relazione allo stato dell'impianto rispetto alla rete pubblica, se disponibile, si hanno:
 - Impianti in isola (off-grid e stand-alone)
 - **Impianti connessi alla rete** (grid-connected)
 - Funzionano quando è disponibile la rete pubblica
 - Tensione nominale della rete cui sono connessi dipende dalla potenza nominale dell'impianto
 - Il surplus di generazione rispetto al carico locale è iniettato nella rete, mentre il consumo eccedente la produzione (es. consumo notturno) è prelevato dalla rete (sistema di accumulo equivalente)
 - Interesse economico
 - Negli impianti fotovoltaici abbinati ad utenze, il costo per la produzione locale può essere inferiore al prezzo di acquisto dell'energia elettrica
 - Nelle centrali di produzione, il prezzo di vendita dell'energia consente di ripagare i costi di installazione e gestione

55

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Tipologie di impianti fotovoltaici

- In relazione allo stato dell'impianto rispetto alla rete pubblica, se disponibile, si hanno:
 - Impianti in isola (off-grid e stand-alone)
 - **Impianti connessi alla rete** (grid-connected)



56

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

- **Procedura di massima per la progettazione di un impianto fotovoltaico:**

- Valutazione dell'area disponibile
- Calcolo della potenza massima installabile
 - Definizione della potenza nominale di impianto in relazione ai vincoli di progetto
 - Occupazione dell'area
 - Vincoli ambientali e costruttivi
 - Budget
- Identificazione della tipologia di struttura dell'impianto
 - Fisso
 - A inseguimento (monoassiale orizzontale, monoassiale ad asse inclinato, biassiale)
 - A concentrazione
- Definizione del posizionamento dei pannelli fotovoltaici. Sono possibili:
 - Posizionamento vincolato
 - Posizionamento libero



57

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

- **Posizionamento vincolato:**

- In alcuni casi l'orientazione e/o l'inclinazione dei pannelli sono vincolati da aspetti esterni non influenzati dalla progettazione dell'impianto
 - Esempio 1: conformazione di una copertura
 - Esempio 2: Pendenza dell'area destinata alla realizzazione dell'impianto
- Il posizionamento dei pannelli fotovoltaici dovrà essere studiato al fine di evitare condizioni di ombreggiamento sistematico
 - Se non possibile, è necessario contenerne l'effetto (es. scegliendo opportunamente la modalità di posa del pannello in relazione alla connessione interna dei diodi di by-pass)



► Figura 5.18 Esempio di impianto fotovoltaico su shed di un edificio industriale. L'orientamento dei pannelli è vincolato dalla disposizione dell'edificio, l'angolo di tilt è vincolato dalla configurazione in sezione degli shed che realizzano la copertura dello stabilimento. 58

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

- **Posizionamento libero** (in presenza di tetti piani opportunamente estesi o di terreni piani). Scopi della progettazione possono essere:
 - **Massimizzare la producibilità unitaria [kWh/kWp anno]**
 - Orientazione dei pannelli allineata alla direttrice nord-sud
 - Inclinazione ottimizzata per massimizzare la producibilità unitaria dell'impianto
 - In caso di disposizione su più filari, passo sufficiente per escludere fenomeni di ombreggiamento sistematico
 - **Massimizzare la potenza installabile [kWp]**
 - Compromesso opportuno, condiviso con il committente, tra potenza installabile e producibilità unitaria conseguibile
 - Su superficie disponibile piana, la configurazione che massimizza la potenza installabile è quella con pannelli posti orizzontalmente (senza fenomeni di ombreggiamento interno)
 - È possibile identificare una soluzione ottimale intermedia tra l'installazione orizzontale dei pannelli e la configurazione che massimizza la producibilità unitaria
 - In ogni caso è opportuno prestare attenzione all'evitare ombreggiamenti sistematici (o a mitigarne gli effetti in termini di perdita di producibilità)

59

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

Impianto finalizzato alla massimizzazione della producibilità unitaria, circa 0,9 MW



Impianto in cui si è cercato di massimizzare la potenza installata per unità di suolo occupata, circa 70 MW

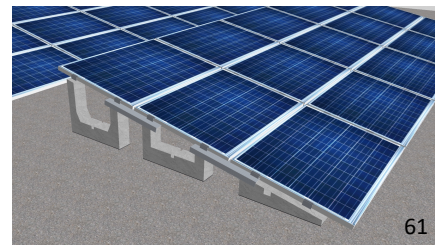


60

Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

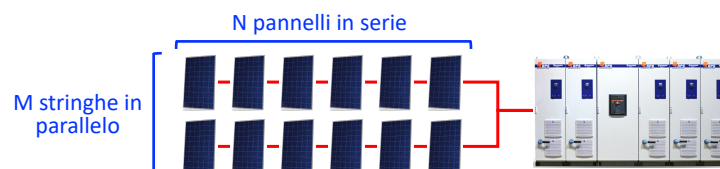
- **Ulteriori passi per la progettazione di massima di un impianto fotovoltaico:**
 - In caso di parziale ombreggiamento, valutazione delle perdite di producibilità conseguenti
 - **Verifiche di stabilità statica** e definizione delle **modalità di ancoraggio** (alla copertura, alla parete, al terreno, ecc.)
 - Da considerare le caratteristiche del supporto e agli eventuali vincoli progettuali
 - Esempio: impatto degli ancoraggi fissi in calcestruzzo in terreni a destinazione non industriale)
 - Soluzioni più diffuse:
 - Ancoraggio a vite (tramite sistemi chimici, meccanici, viti nel terreno, ecc.)
 - Fissaggio tramite zavorre



Sezione B – Capitolo 5 – Impianti fotovoltaici

Progettazione preliminare di un impianto fotovoltaico

- **Ulteriori passi per la progettazione di massima di un impianto fotovoltaico:**
 - Scelta dei pannelli fotovoltaici (tecnologia, dimensioni, parametri elettrici)
 - **Configurazione elettrica del campo fotovoltaico in DC** (n. pannelli per stringa N, n. di stringhe in parallelo M) in relazione alle caratteristiche principali dei dispositivi a valle del campo fotovoltaico (es. tensione in ingresso del convertitore statico che implementa la funzione MPP Tracker)



- Scelta finale dell'inverter
- Dimensionamento delle linee di collegamento (cavi)
- Dimensionamento dei dispositivi di protezione, degli organi di manovra, dei sistemi ausiliari e degli impianti per la sicurezza, se richiesti
- Redazione della **documentazione di progetto**: progetto preliminare, progetto definitivo, progetto esecutivo, progetto as-built (a valle dell'installazione dell'impianto)

62