

SEZIONE 3.3

Principi di funzionamento, limiti e potenzialità di fotovoltaico ed eolico

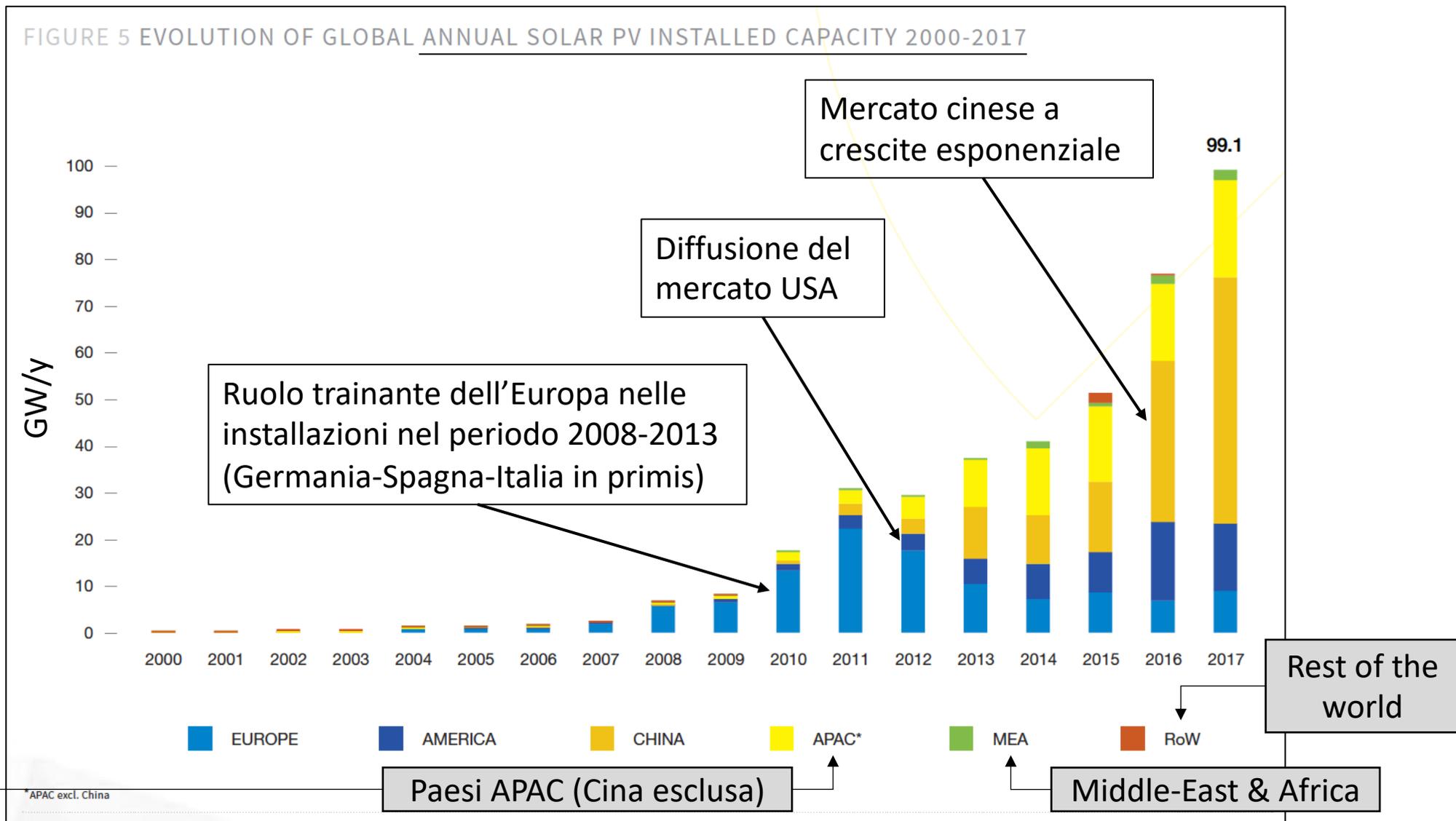
Fabio Bignucolo

*Dipartimento di Ingegneria Industriale
Università di Padova*

Centro studi Levi Cases

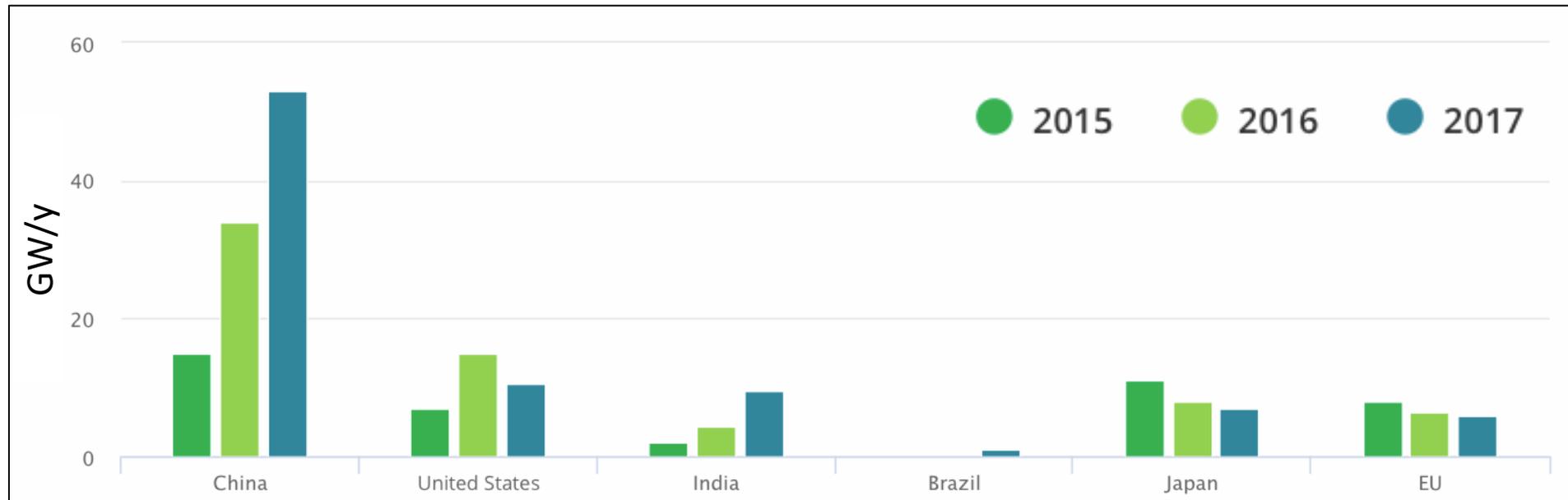


Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici



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

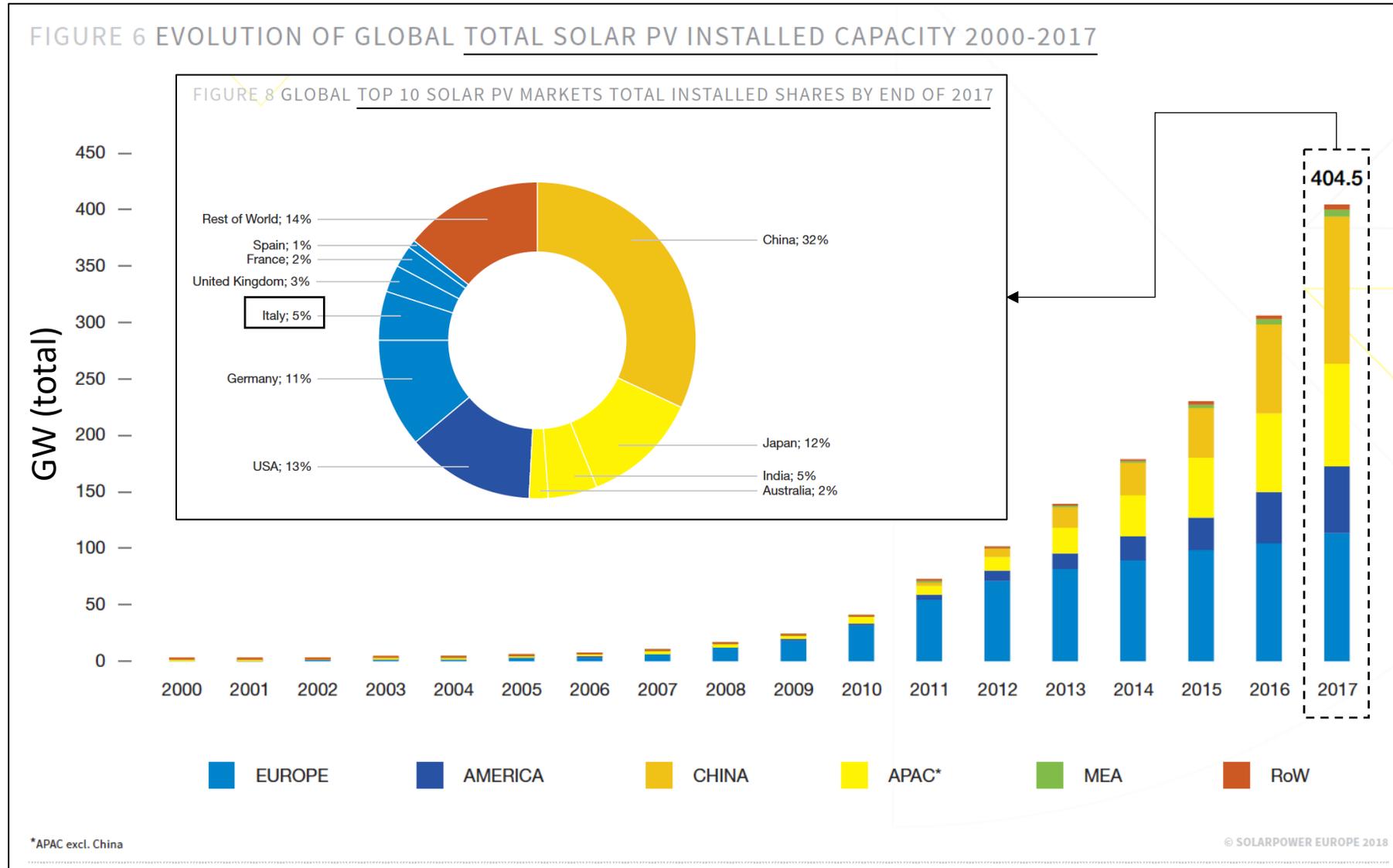
Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici



(fonte: IEA, dati consuntivi 2018)

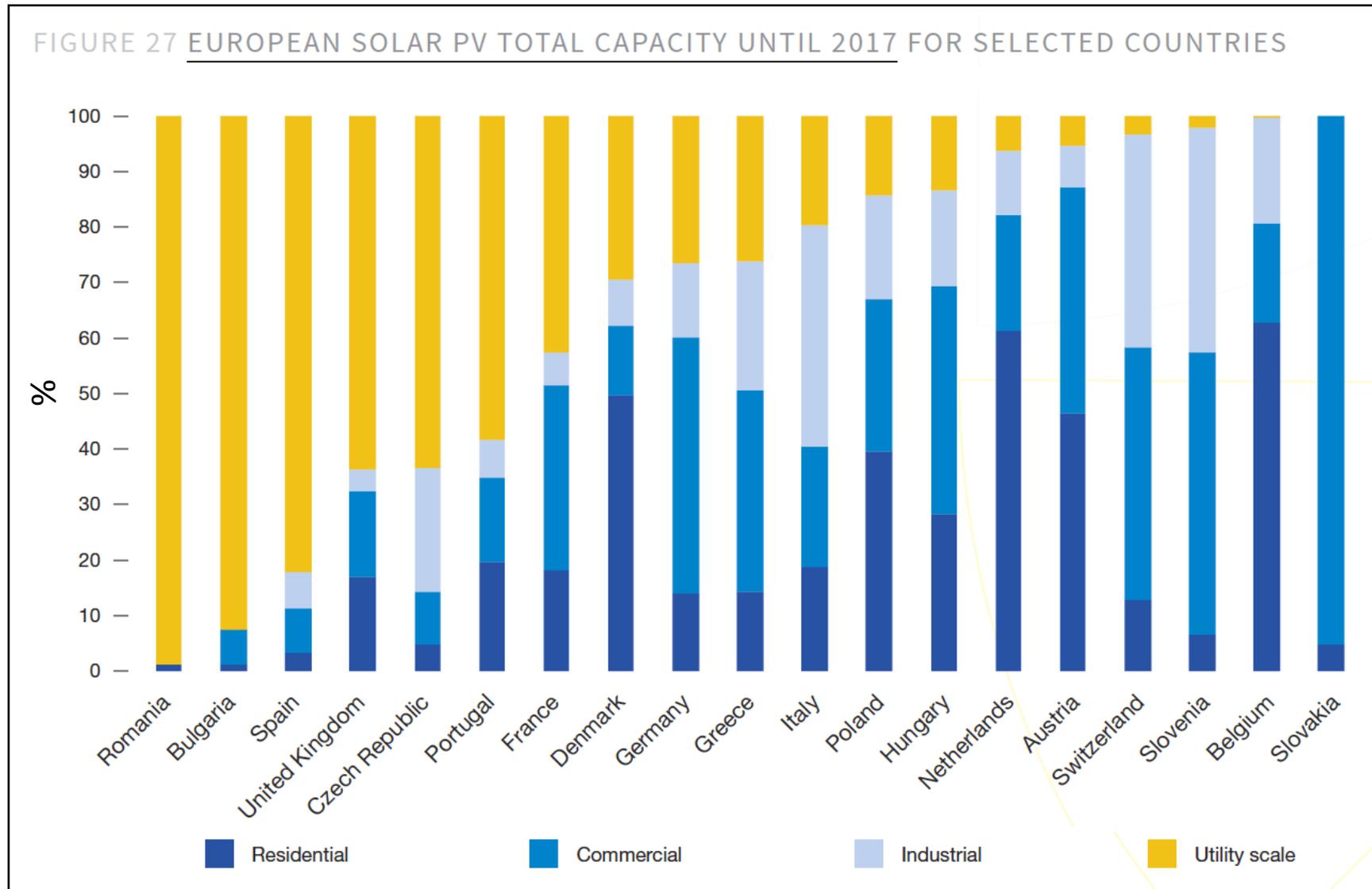
- **Potenza installata 95-98 GW nel 2017** (di cui 53 GW in Cina)
- Mercato in espansione, ma i prezzi del FV sono attesi in diminuzione per l'aumento della capacità produttiva
- La Cina produce più dei 2/3 dei moduli fotovoltaici
- USA sono il secondo mercato fotovoltaico a livello mondiale (sebbene 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%)

Evoluzione del fotovoltaico su scala mondiale: dati storici



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

Evoluzione del fotovoltaico su scala europea: dati storici

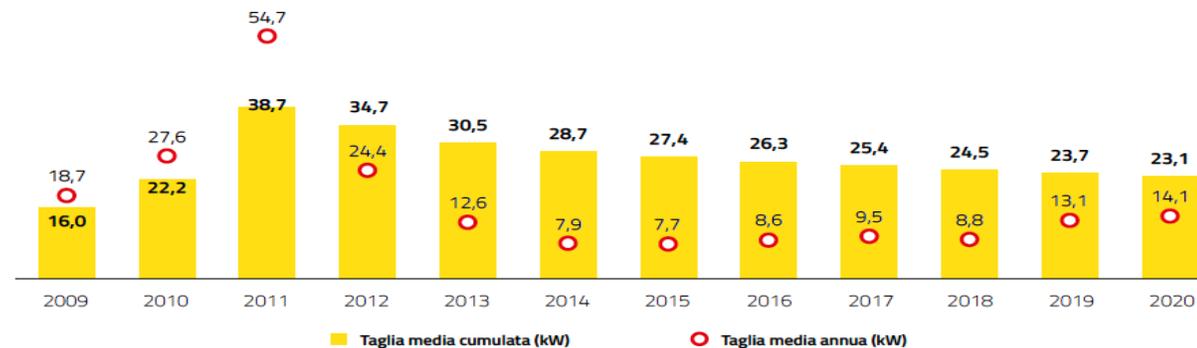
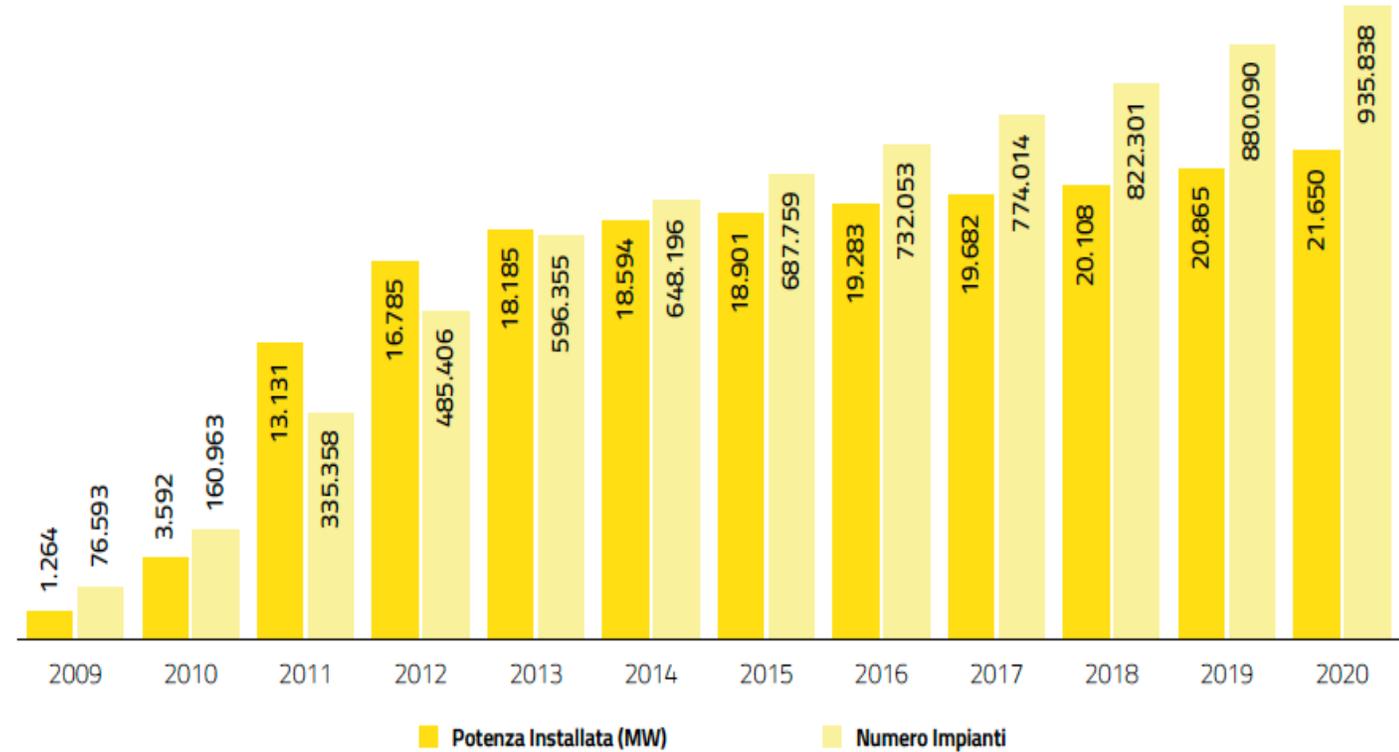


(fonte: Global Market Outlook, SolarPower Europe, dati consuntivi 2017)

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

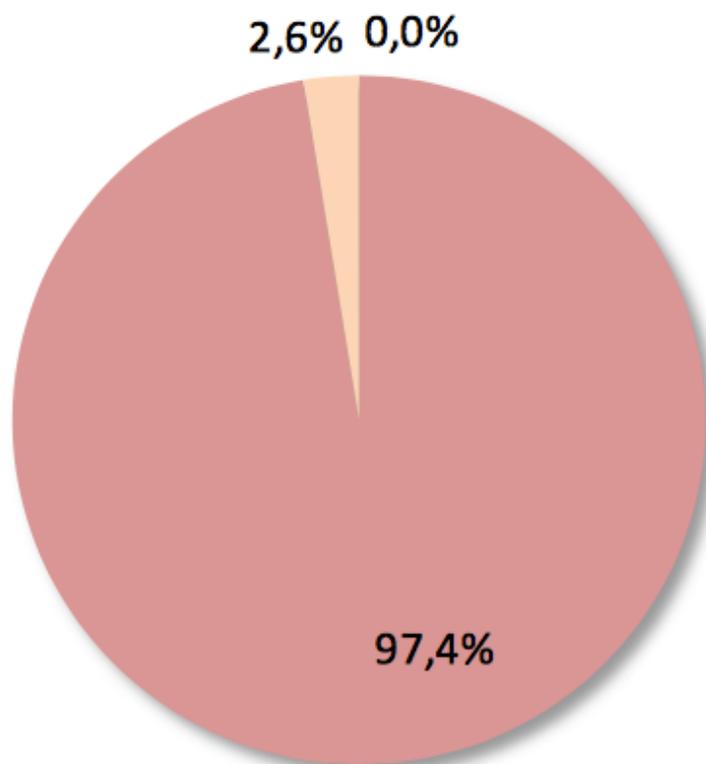
Classi di potenza	Numero	Potenza (MW)	Produzione (GWh)
P ≤ 3	312.196	839	916
3 < P ≤ 20	552.571	3.912	4.183
20 < P ≤ 200	58.542	4.585	4.752
200 < P ≤ 1.000	11.361	7.652	9.078
P > 1000	1.168	4.662	6.013
Totale	935.838	21.650	24.942

Classi di potenza (kW)	Installati nell'anno 2019		Installati nell'anno 2020		Var % 2020/2019	
	Numero	Potenza (MW)	Numero	Potenza (MW)	Numero	Potenza (MW)
1 ≤ P ≤ 3	17.856	43,6	14.825	35,0	-17,0	-19,7
3 < P ≤ 20	37.941	228,5	38.146	234,2	0,5	2,5
20 < P ≤ 200	2.150	155,7	2.282	181,3	6,1	16,4
200 < P ≤ 1.000	228	90,5	282	145,5	23,7	60,8
1.000 < P ≤ 5.000	6	18,9	9	24,1	50,0	27,5
P > 5.000	9	214,2	6	129,0	-33,3	-39,8
Totale	58.190	751,4	55.550	749,2	-4,5	-0,3



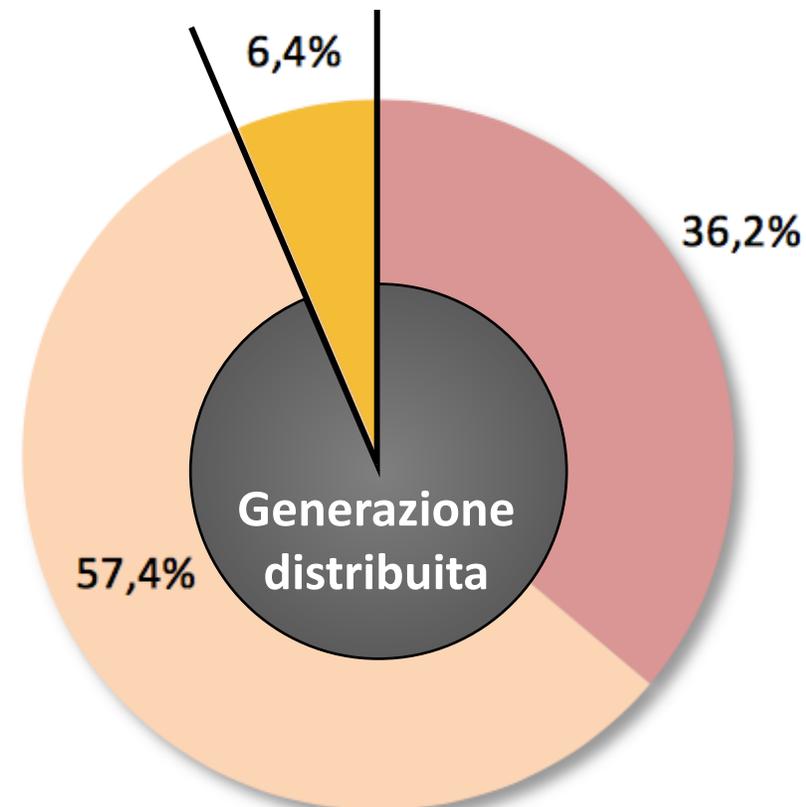
Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

Numero impianti a fine 2017 (%)



Livello di tensione	Numero di impianti
BT	~ 753.900
MT	~ 20.100
AT	< 400

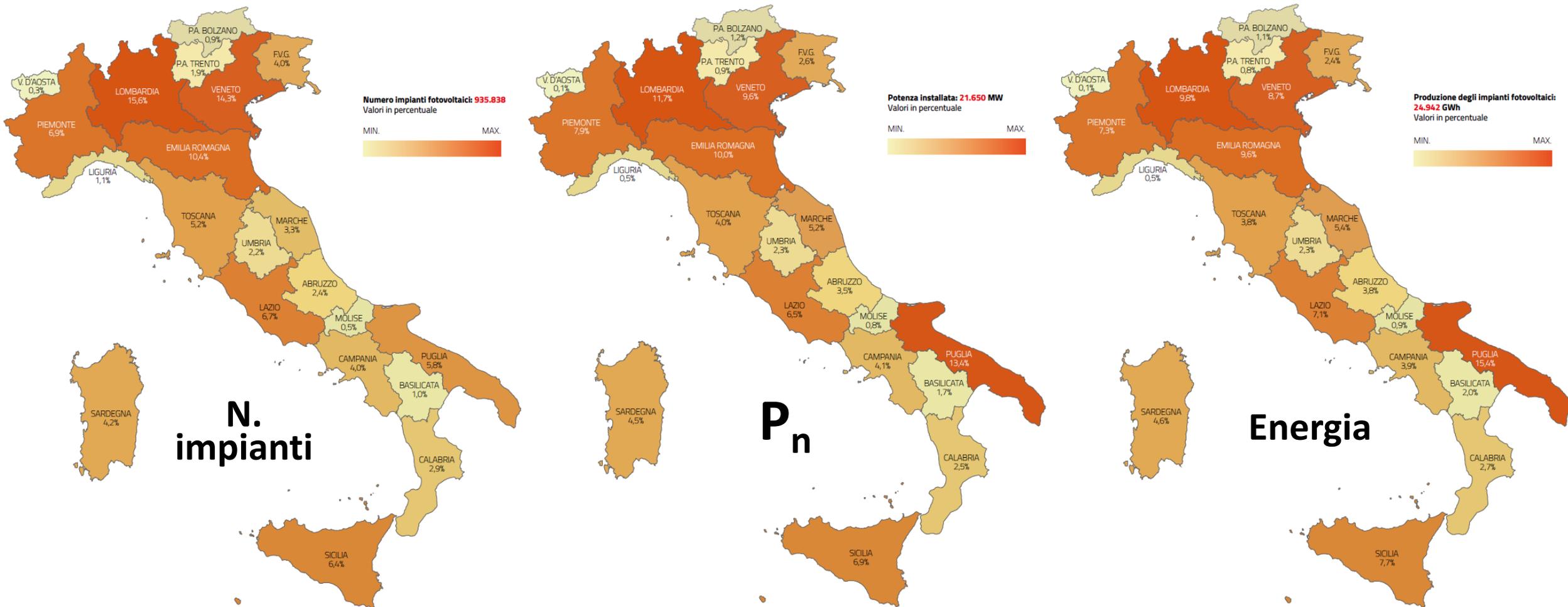
Potenza a fine 2017 (%)



Livello di tensione	Potenza [GW]
BT	~ 7,12
MT	~ 11.30
AT	~ 1.26

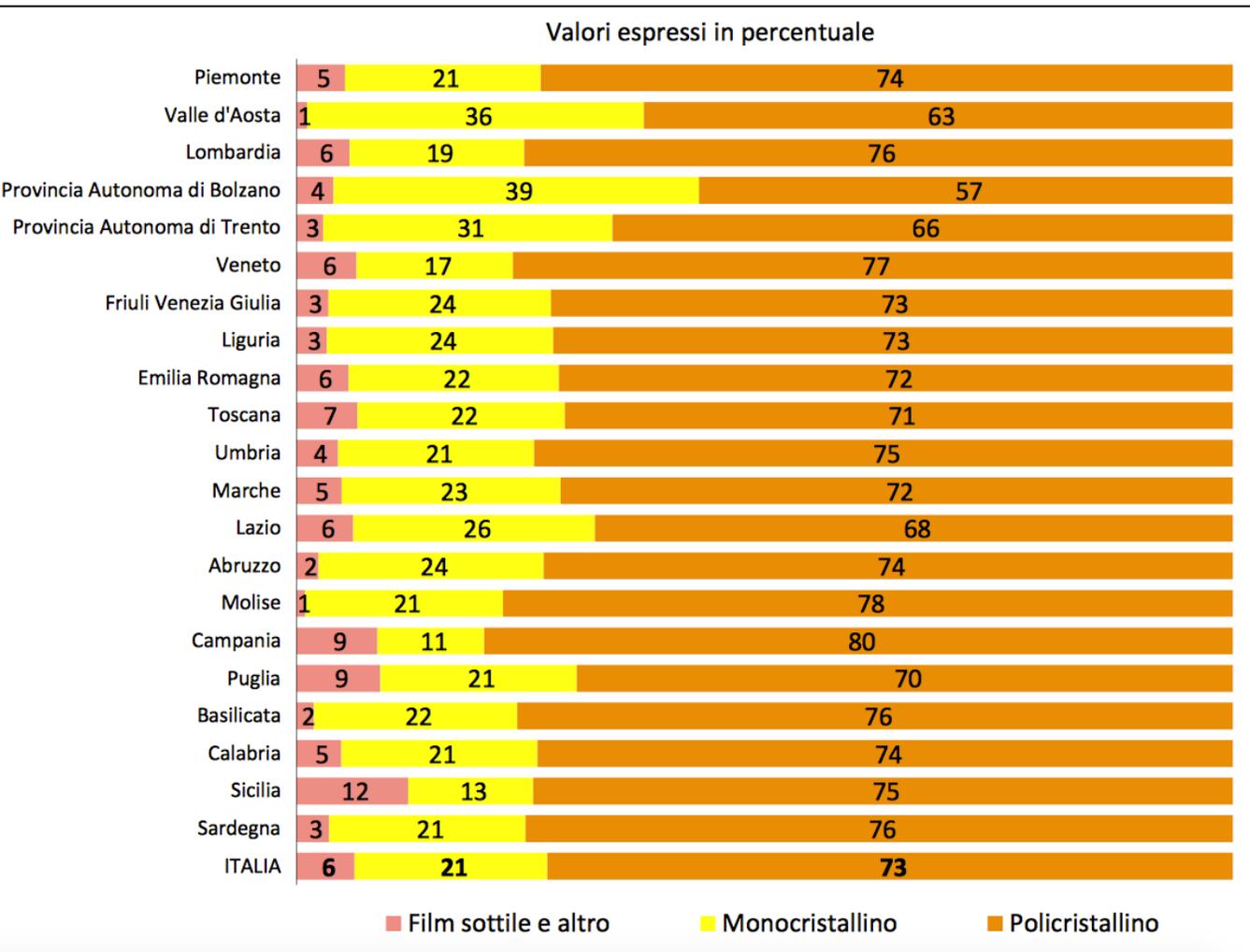
(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana



(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2020)

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana

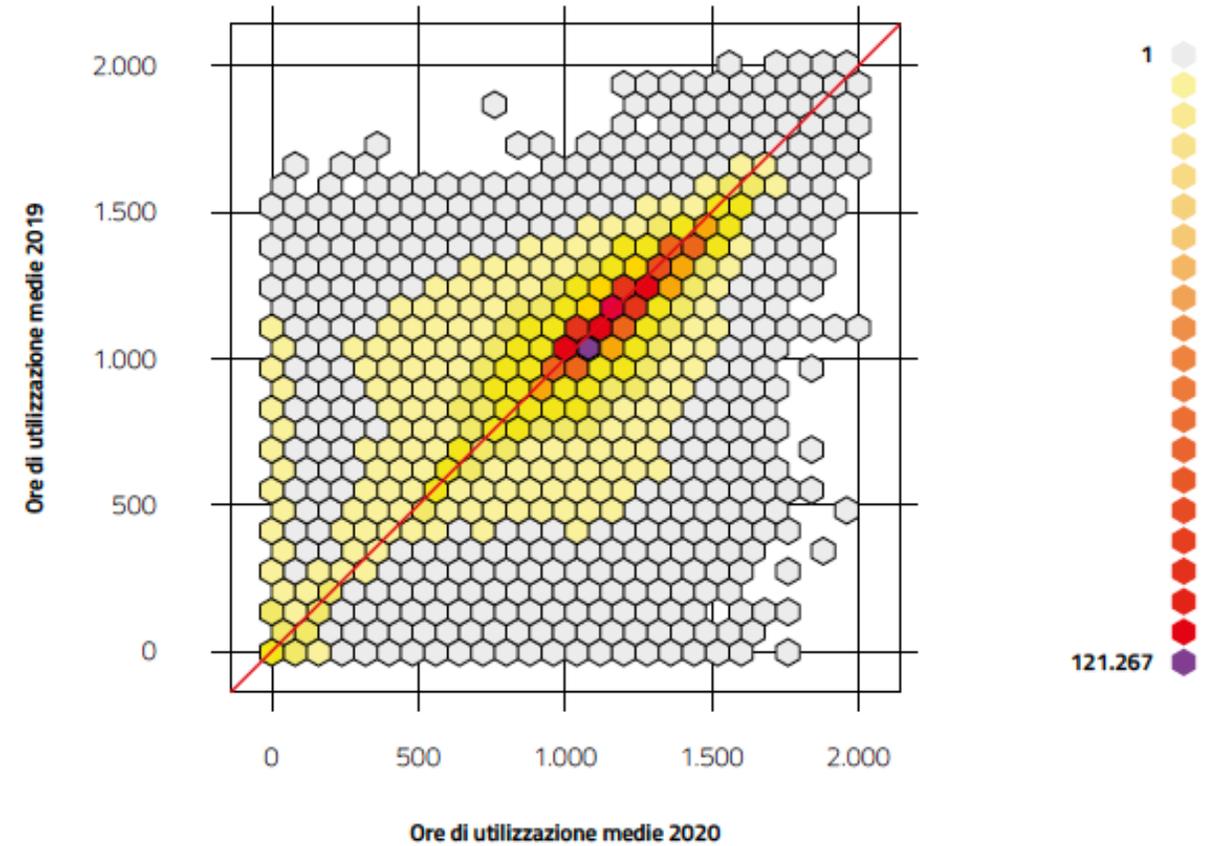
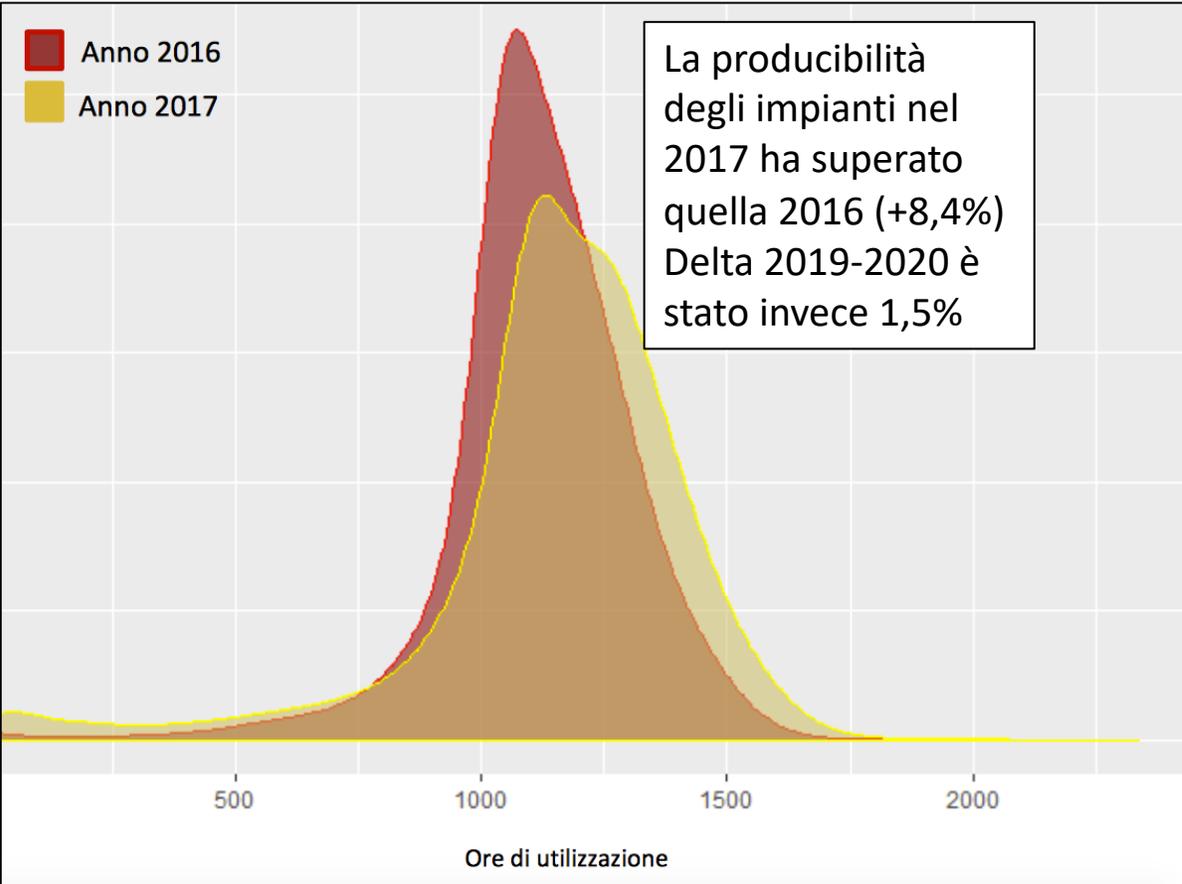


(fonte: Gestore Servizi Energetici, 2017)

	Agricoltura	Domestico	Industria	Terziario	Totale
N. impianti	27.749	627.739	31.609	86.917	774.014
Potenza installata [MW]	2.577	3.026	9.674	4.405	19.682
Produzione lorda [GWh]	3.214	3.514	12.600	5.050	24.378
Producibilità media [h/y]	1.247	1.161	1.302	1.146	1.239
Autoconsumo [GWh]	446	1.029	2.077	1.338	4.890
% autoconsumo	13,9%	29,3%	16,5%	26,5%	20,1%

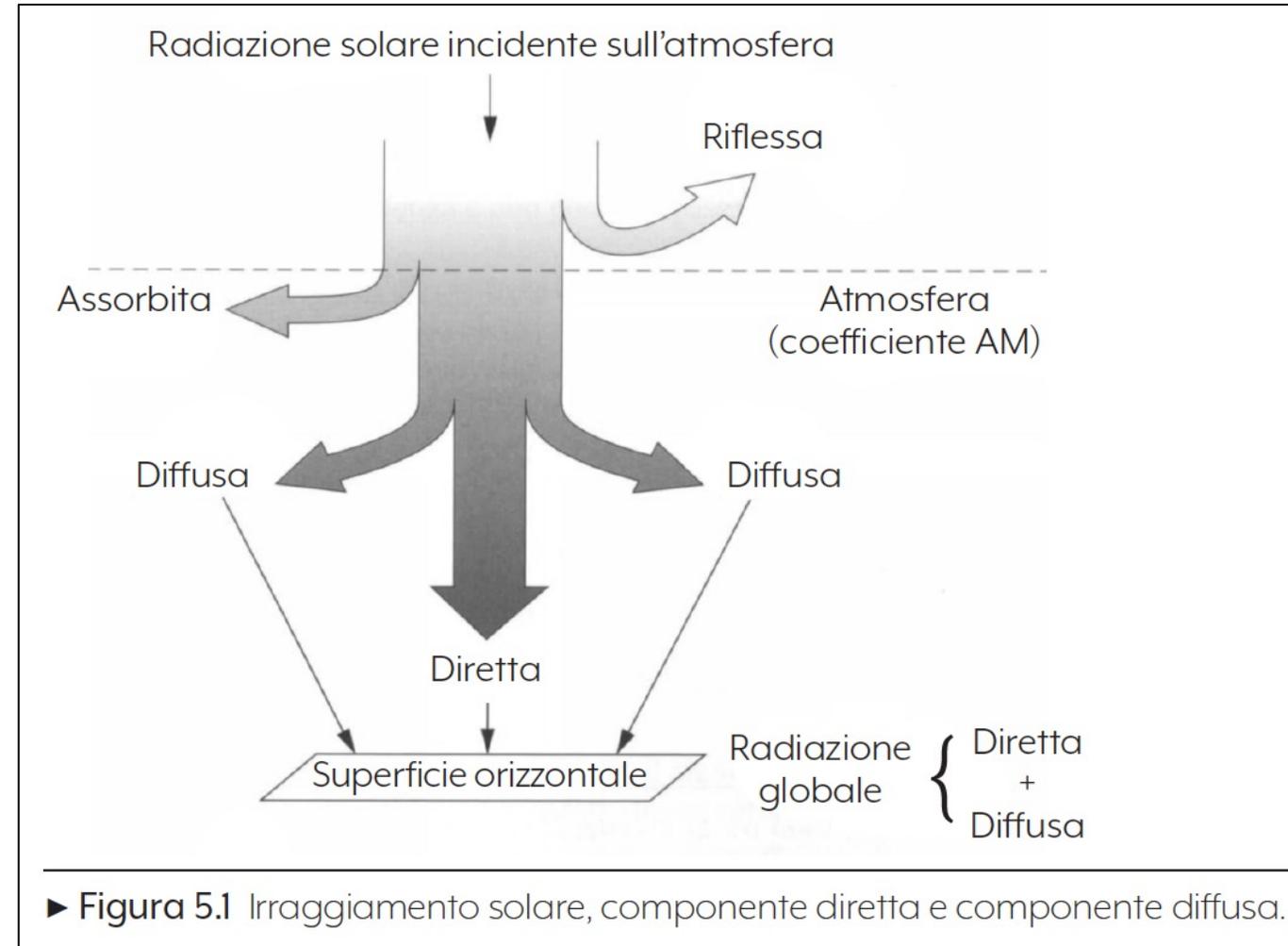
Settore di attività	Taglia media impianti (kW)	
	al 31/12/2017	nell'anno 2017
Agricoltura	92,9	29,3
Domestico	4,8	4,1
Industria	306,1	129,4
Terziario	50,7	26,4
Totale complessivo	25,4	9,4

Evoluzione del fotovoltaico su scala italiana



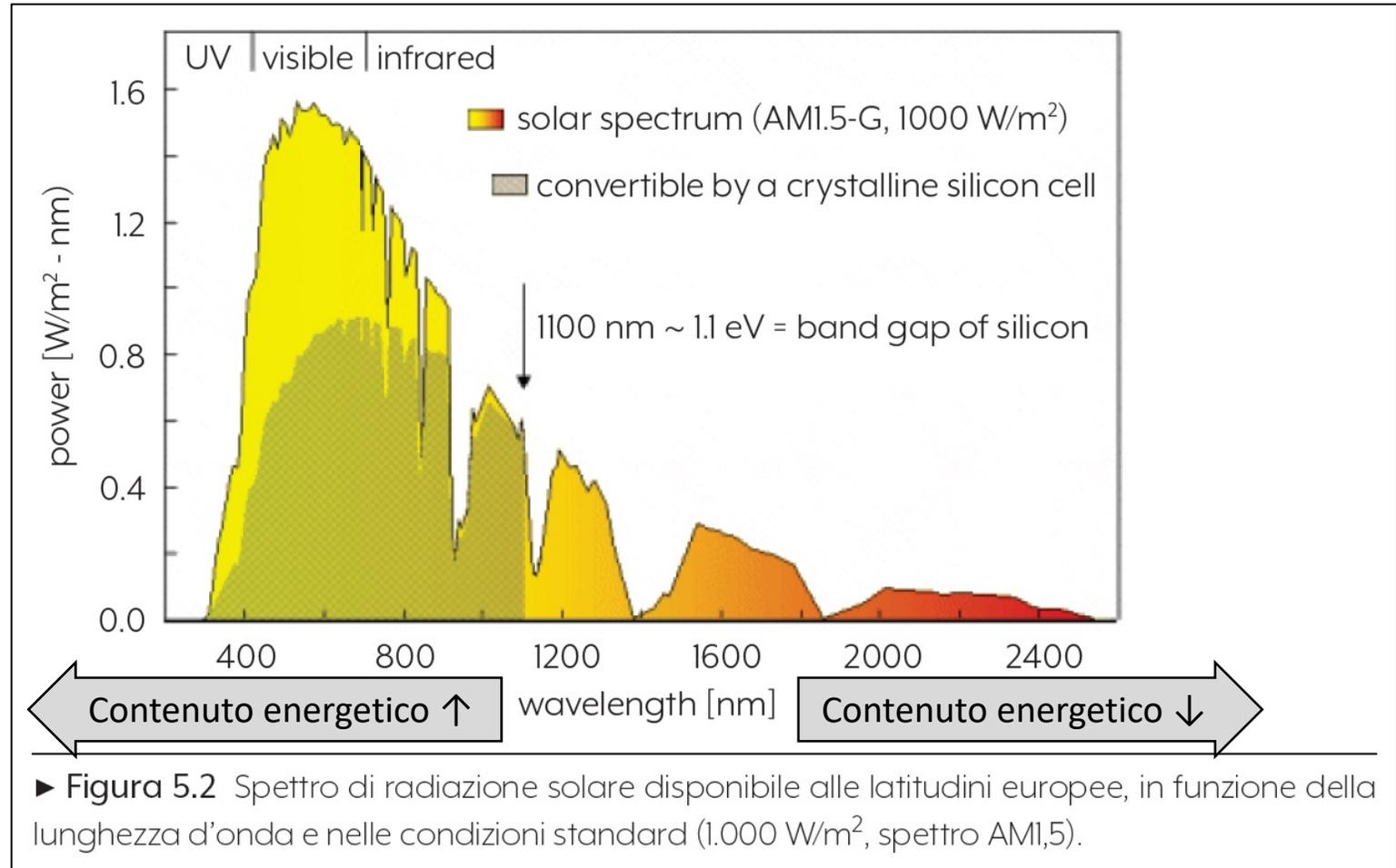
Fonte primaria – Irraggiamento solare

- Intensità dell'irraggiamento solare all'esterno dell'atmosfera: $1,353 \text{ kW/m}^2$ (costante solare)
- Riduzione per riflessione e parziale assorbimento di energia da parte dell'atmosfera
- **Irraggiamento convenzionale sulla superficie terrestre**, su piano ortogonale alla radiazione: $1,0 \text{ kW/m}^2$ (-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



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



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**

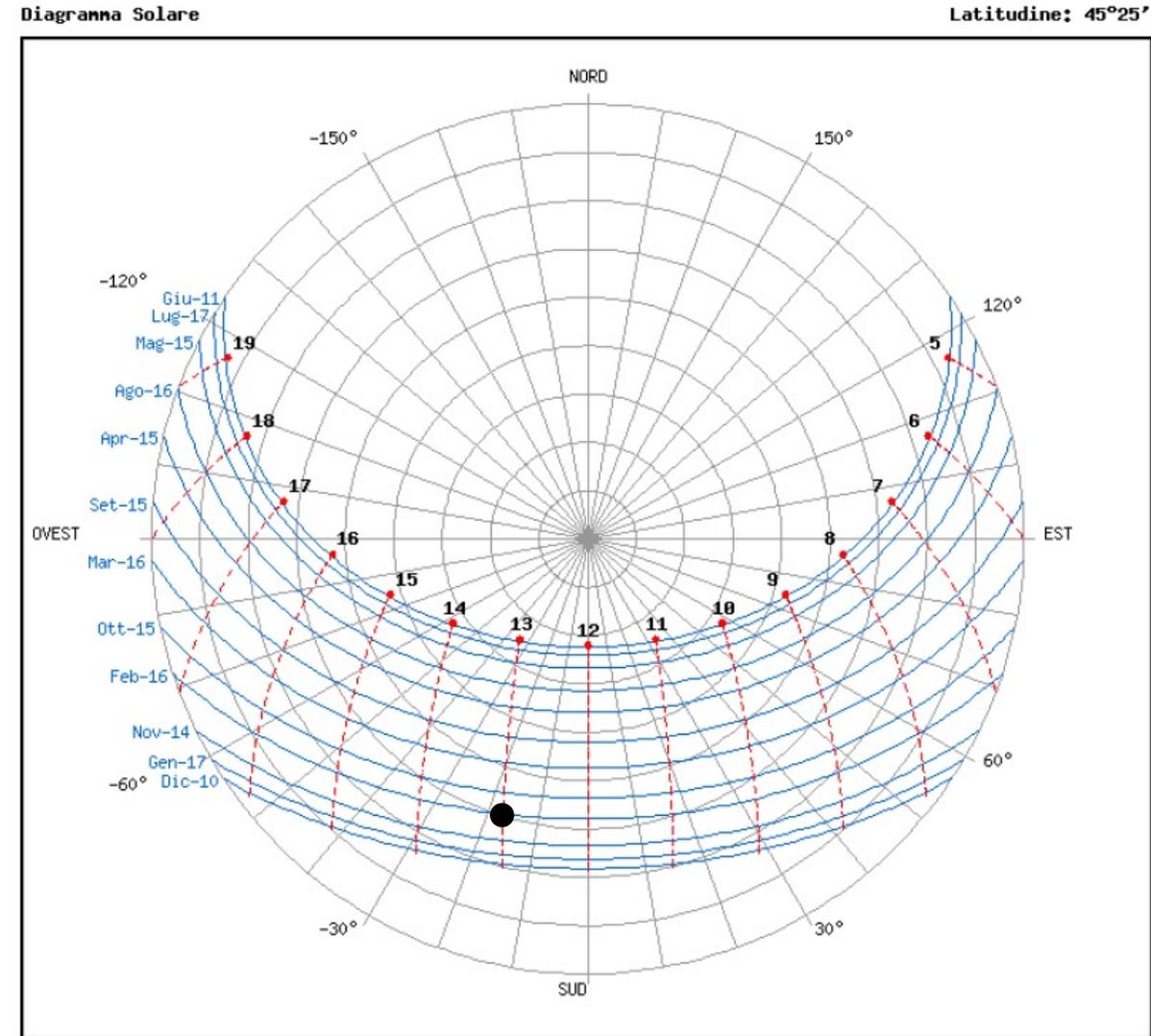
Il comportamento dei pannelli cambia in modo significativo in funzione della tecnologia di conversione

		WEATHER CONDITIONS								
Solar radiation	Clear sky	Foggy	Cloudy	Covered (yellow sun disk)	Covered (white sun disk)	Covered (no sun disk)	Dark foggy	Dark cloudy		
										
Global	1000 W/m ²	600 W/m ²	500 W/m ²	400 W/m ²	300 W/m ²	200 W/m ²	100 W/m ²	50 W/m ²		
Beam	90%	50%	70%	50%	40%	0%	0%	0%		
Diffuse	10%	50%	30%	50%	60%	100%	100%	100%		

► **Figura 5.3** Valori indicativi di irraggiamento solare (componenti diretta e diffusa) per condizioni atmosferiche tipiche.

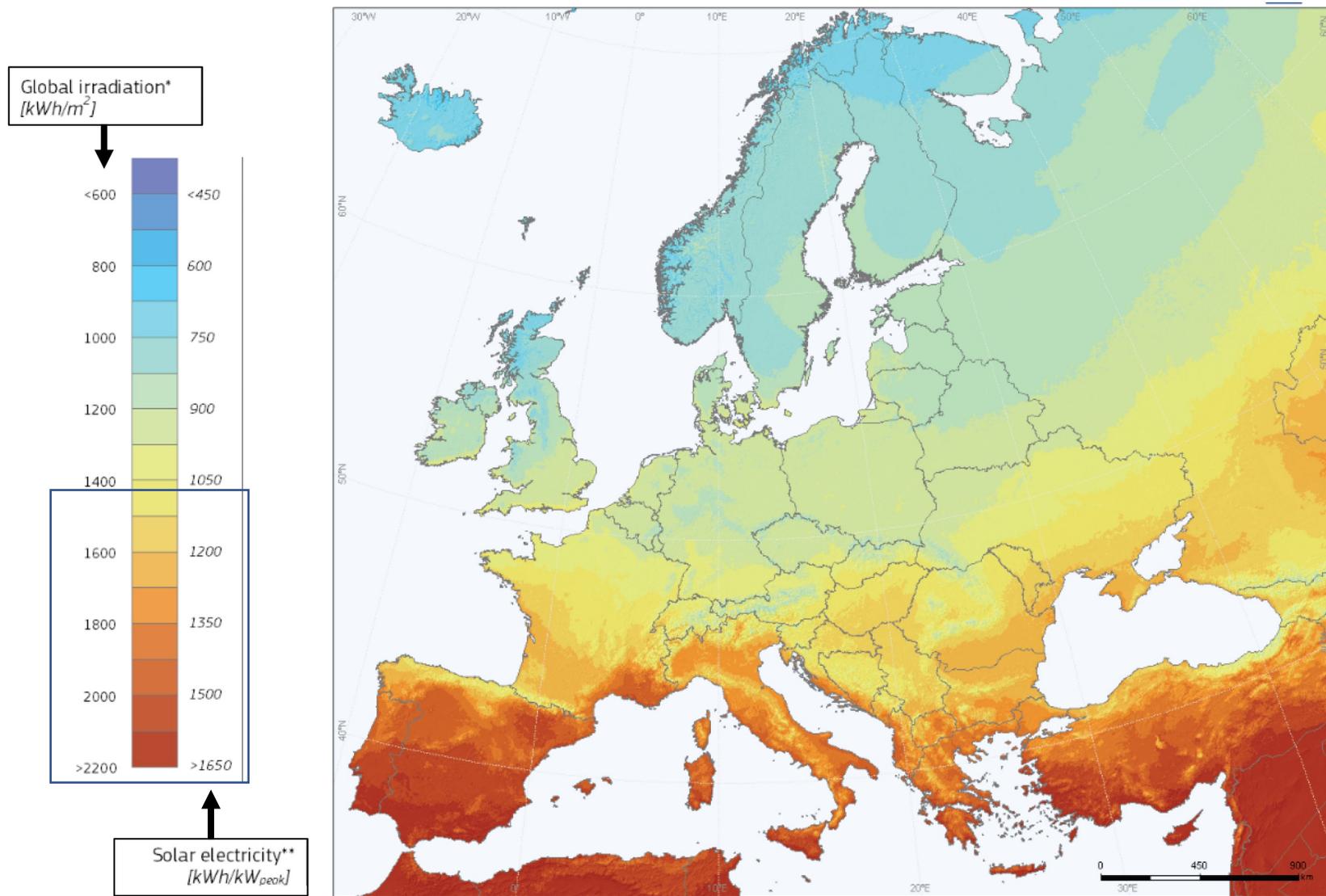
Fonte primaria – Traiettorie solari

- **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)
- 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, valuta sul piano verticale dove giace la direzione del raggio solare



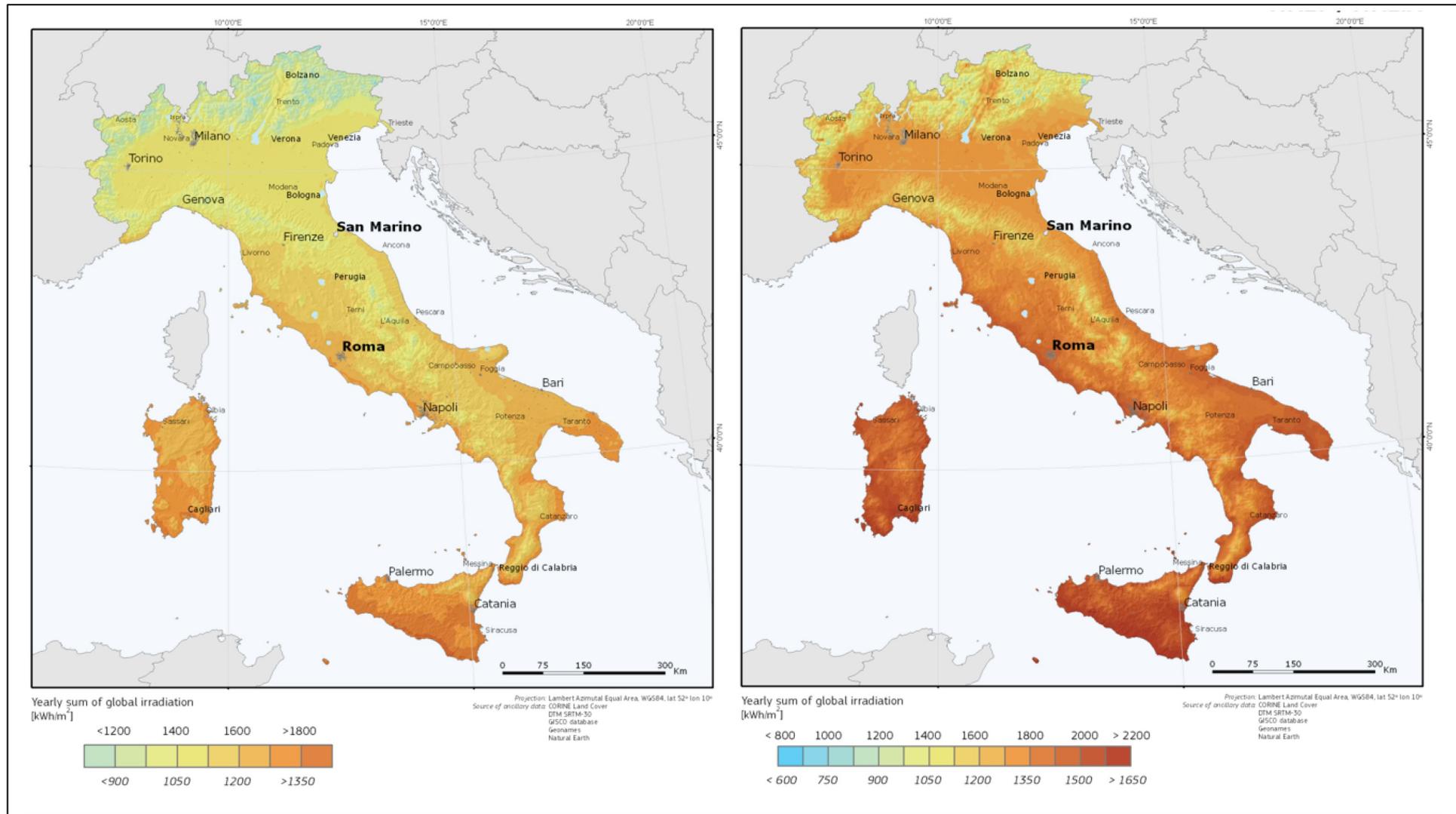
Vista in pianta – Rif. Pdova

Mappa della radiazione solare incidente



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

Mappa della radiazione solare incidente

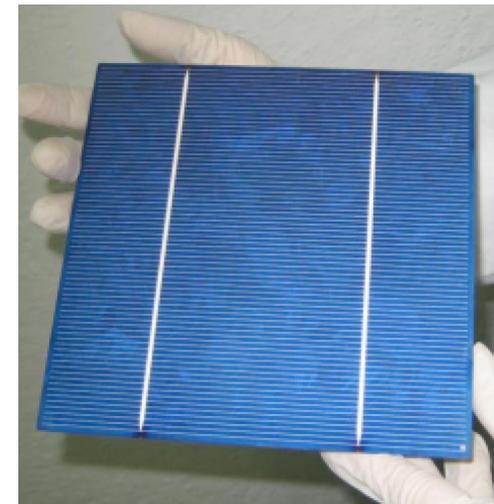
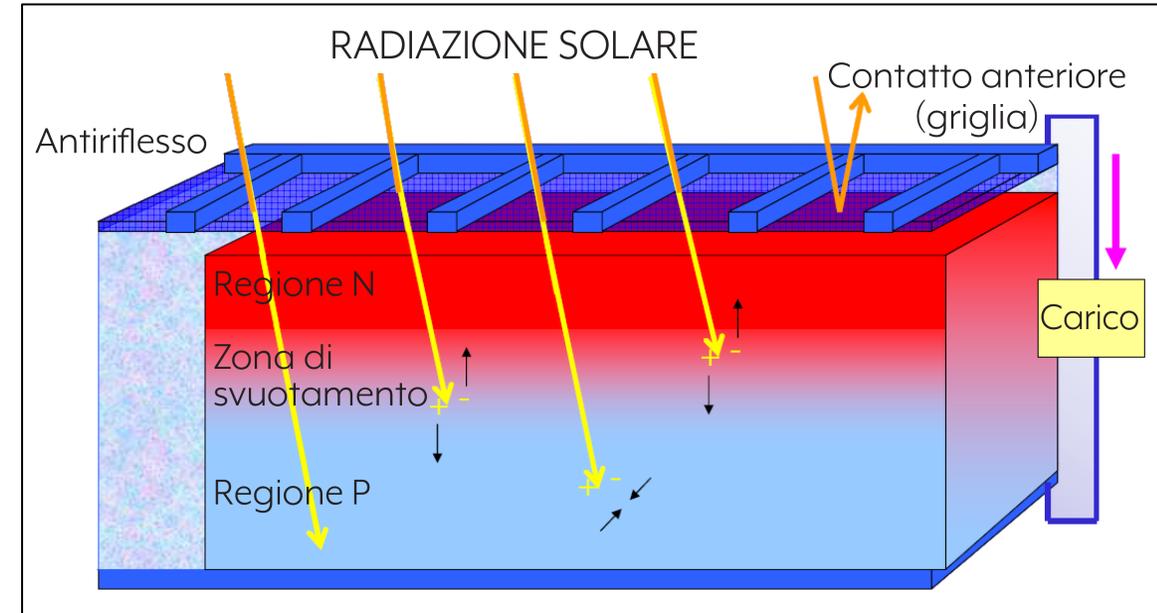


► Figura 5.6

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

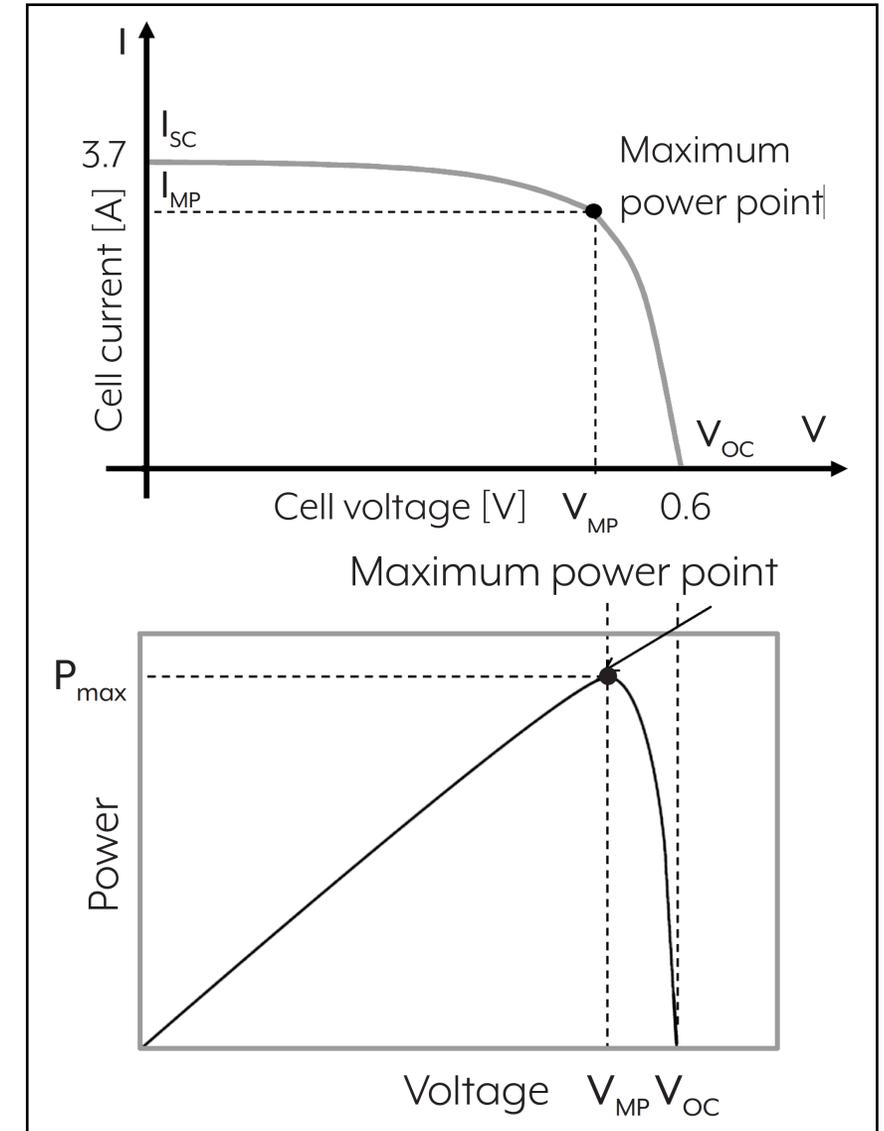
Cella fotovoltaica

- 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



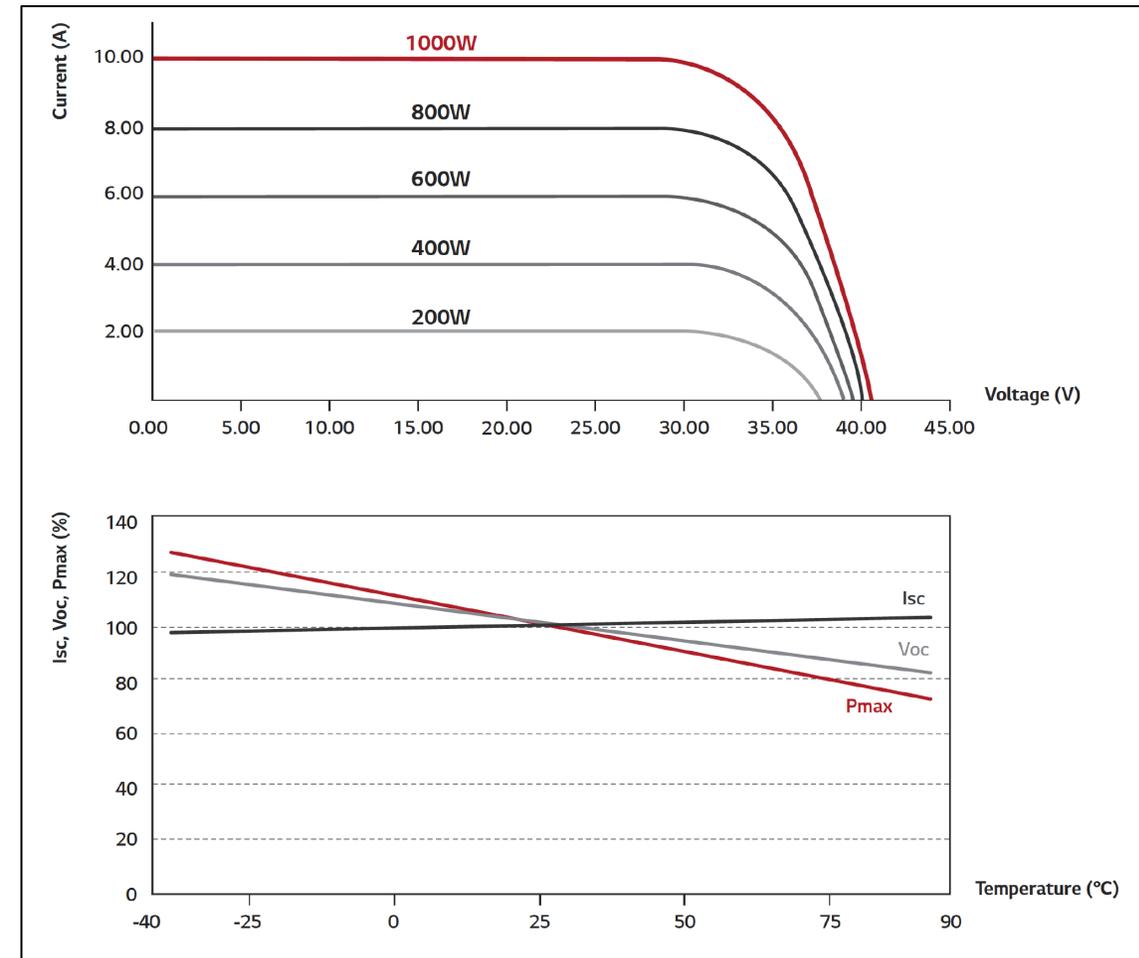
Cella fotovoltaica – Curva di funzionamento

- 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 \rightarrow Tensione a vuoto V_{OC}
- In condizioni di cortocircuito, il diodo viene by-passato \rightarrow 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)** $\rightarrow P_{MP}$ o P_{max}



Cella fotovoltaica – Curva di funzionamento

- La curva reale di funzionamento varia anche sensibilmente nelle condizioni operative reali:
 - 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/m^2) per la maggior parte del tempo
 - Il comportamento a basso irraggiamento è importante nello studio della producibilità
 - 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 $0,3-0,5\%/^{\circ}\text{C}$

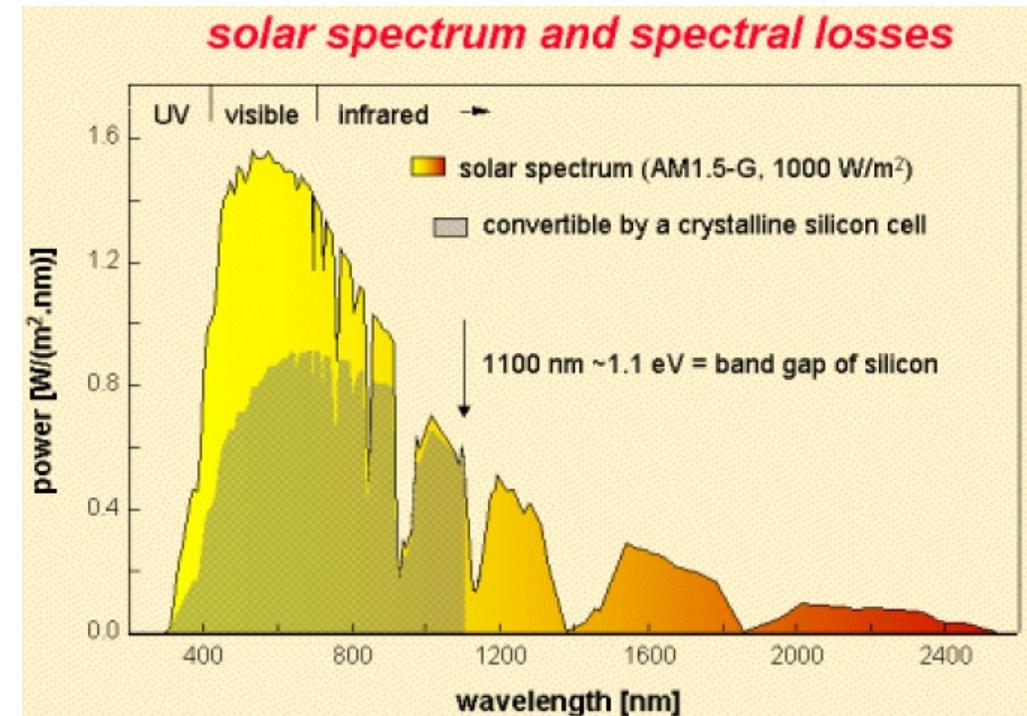


► Figura 5.10 Andamento relativo dei parametri V_{OC} , I_{SC} e potenza massima al variare della temperatura di cella (a), con valori riferiti alla temperatura standard 25°C (le curve si riferiscono ad un pannello in silicio policristallino, con 60 celle da 6 pollici). Dipendenza della curva tensione-corrente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

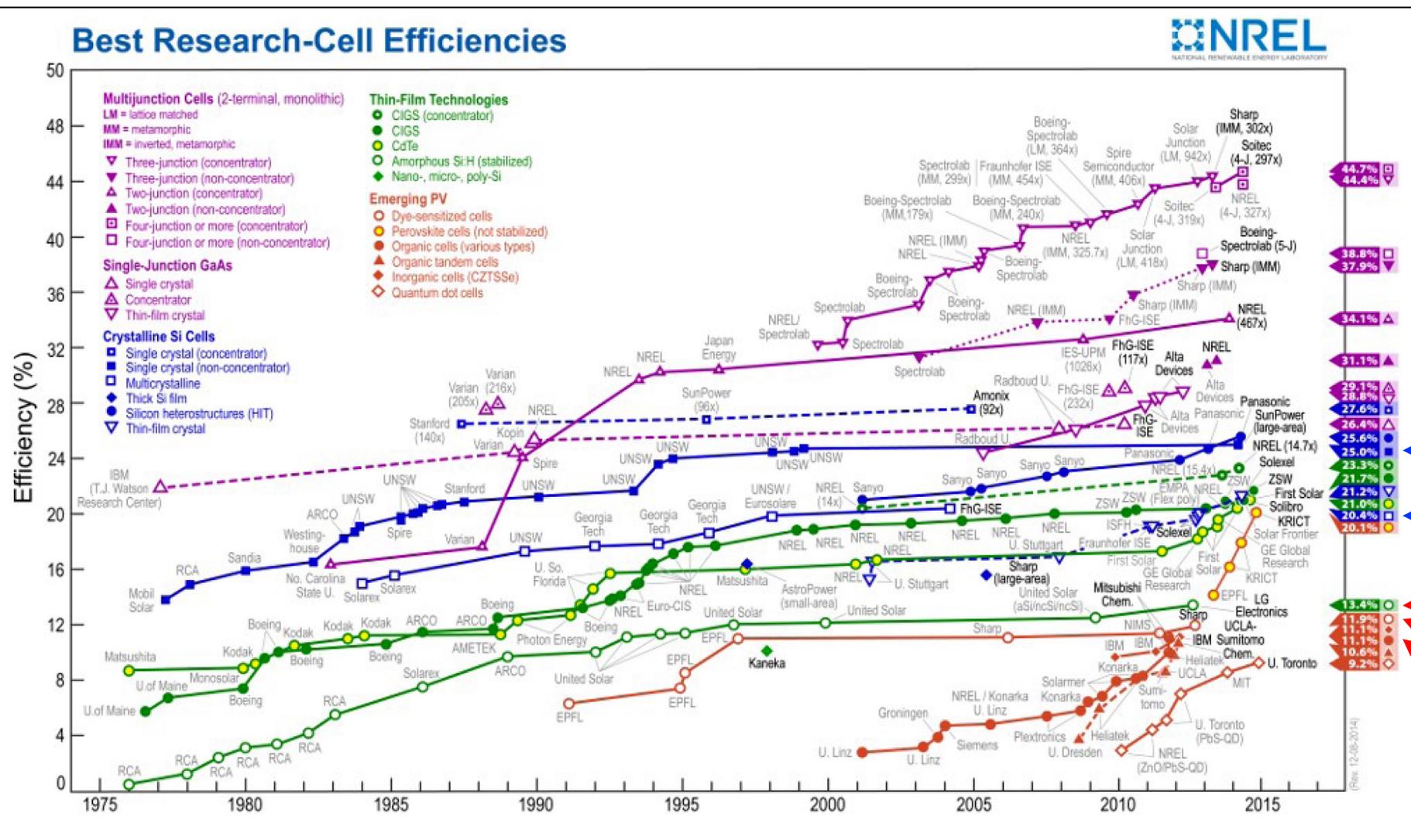
Cella fotovoltaica – Rendimento di conversione

- 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):
 - Radiazione luminosa con insufficiente quantitativo energetico (lunghezza d'onda troppo lunga) per attivare la conversione fotovoltaica
 - Radiazione luminosa con eccessivo quantitativo energetico (lunghezza d'onda corta, ma eccessivo contenuto energetico)
 - Riflessione sulla superficie della cella e ombreggiamento causato dai contatti frontali
 - Perdita per ricombinazione
 - Perdita di gradiente elettrico nella cella
 - Perdite di conduzione (resistenza serie)

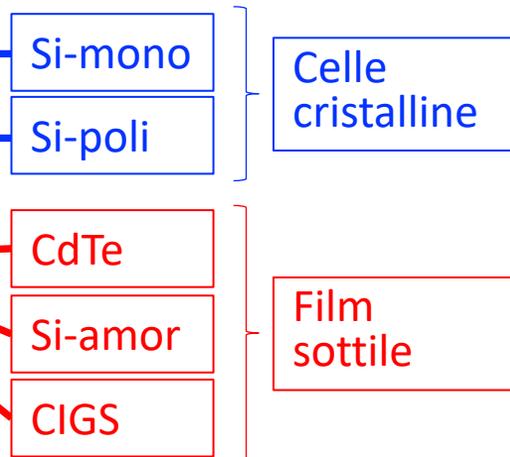
$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FF I_{SC} V_{OC}}{I A}$$



Cella fotovoltaica – Rendimento di conversione



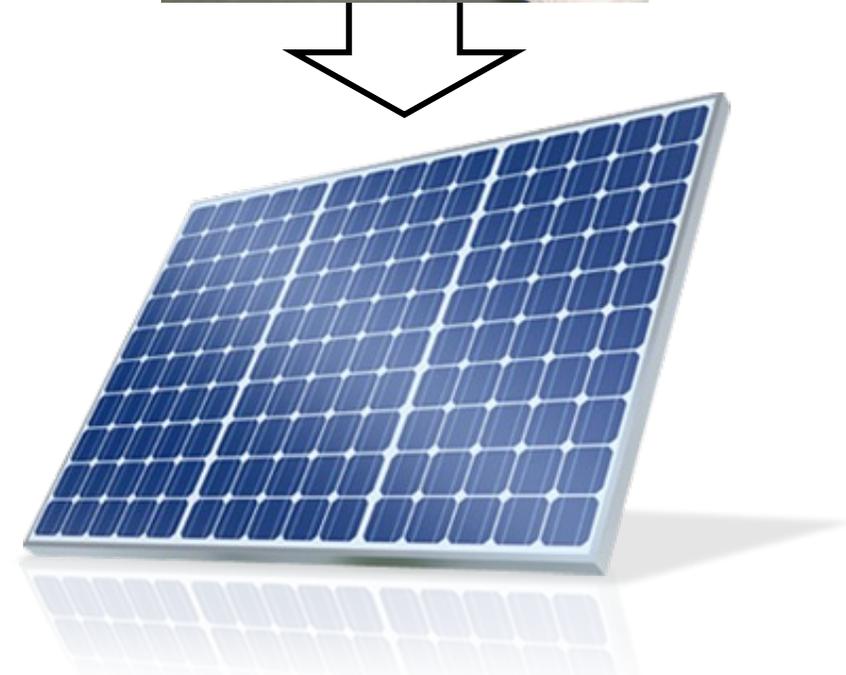
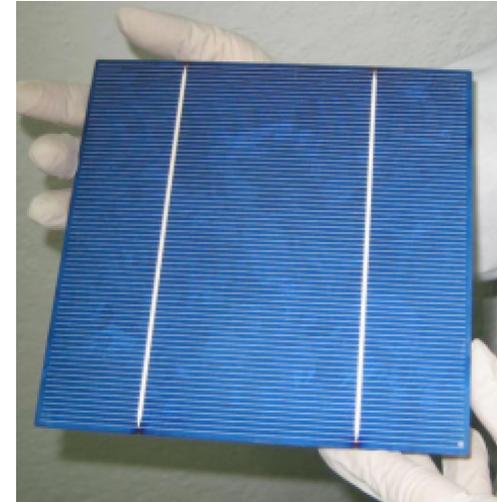
- Applicazioni terrestri → Rendimento nominale compreso tra qualche punto percentuale (es. Si amorfo) e 22-23% (silicio monocristallino ad alta efficienza)



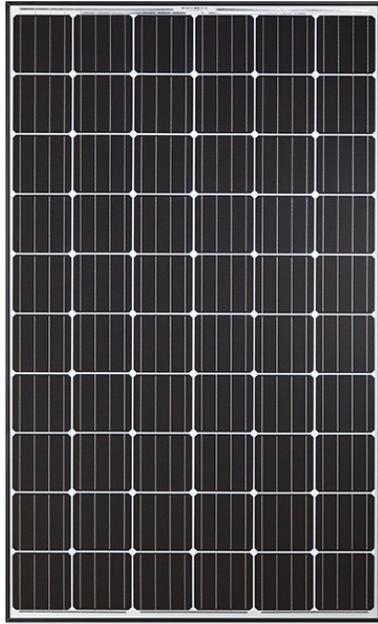
► Figura 5.11 Evoluzione dell'efficienza di conversione delle diverse tecnologie di celle solari negli ultimi quarant'anni. Fonte: NREL.

Pannelli fotovoltaici

- Ogni cella ha la potenza nominale di alcuni Watt
 - Valori di irraggiamento incidente in condizioni standard (STC, 1.000 W/m^2)
 - 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



Pannelli fotovoltaici



Silicio monocristallino
(Si-mono, standard)



Silicio policristallino
(Si-poli, standard)

Silicio cristallino
(circa 5/6 del mercato mondiale)



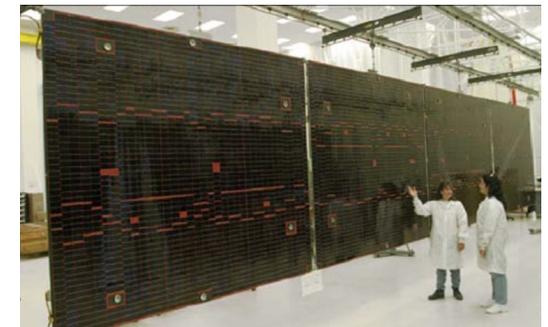
CdTe



Silicio amorfo



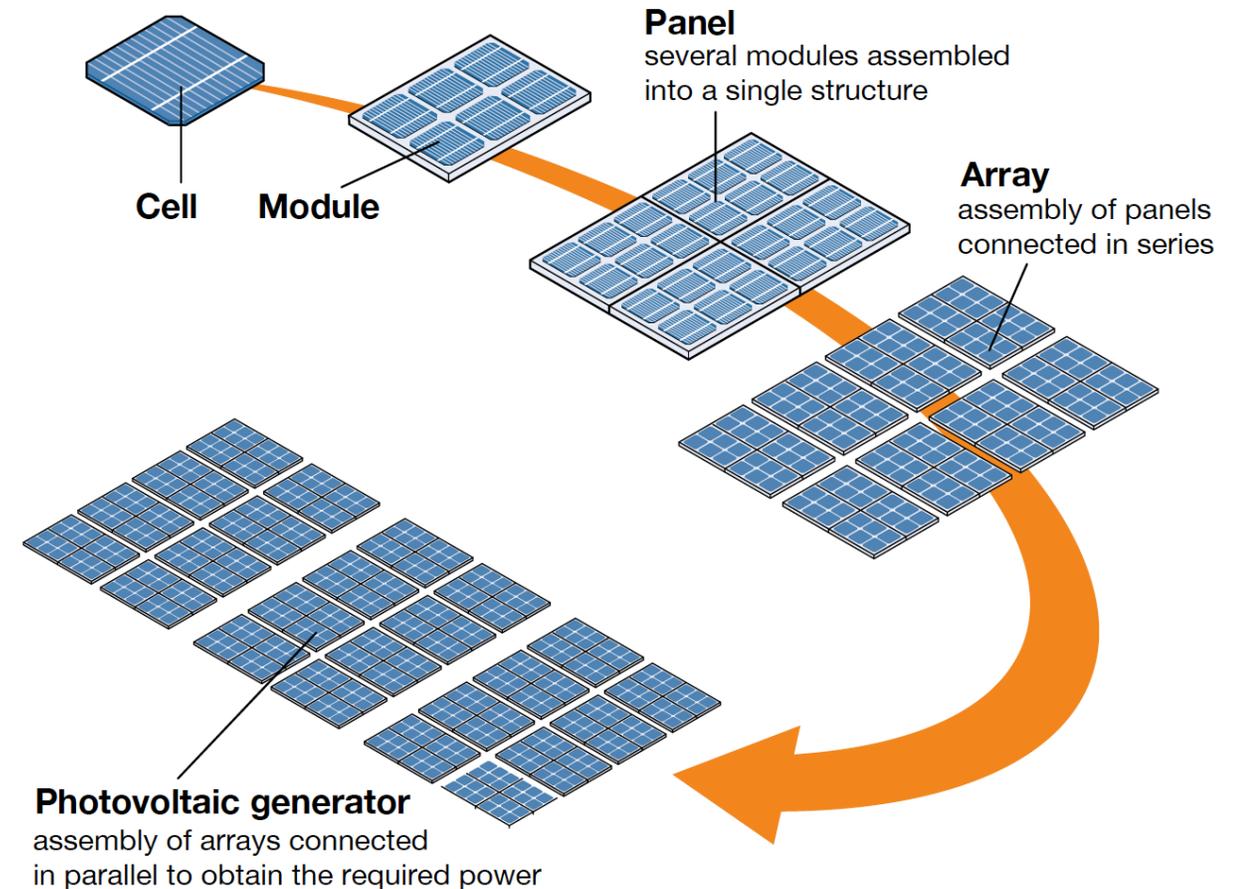
CIGS (copper indium gallium
(di) selenide)



Pannelli multi-giunzione per
applicazioni aerospaziali

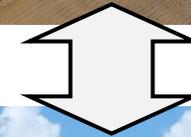
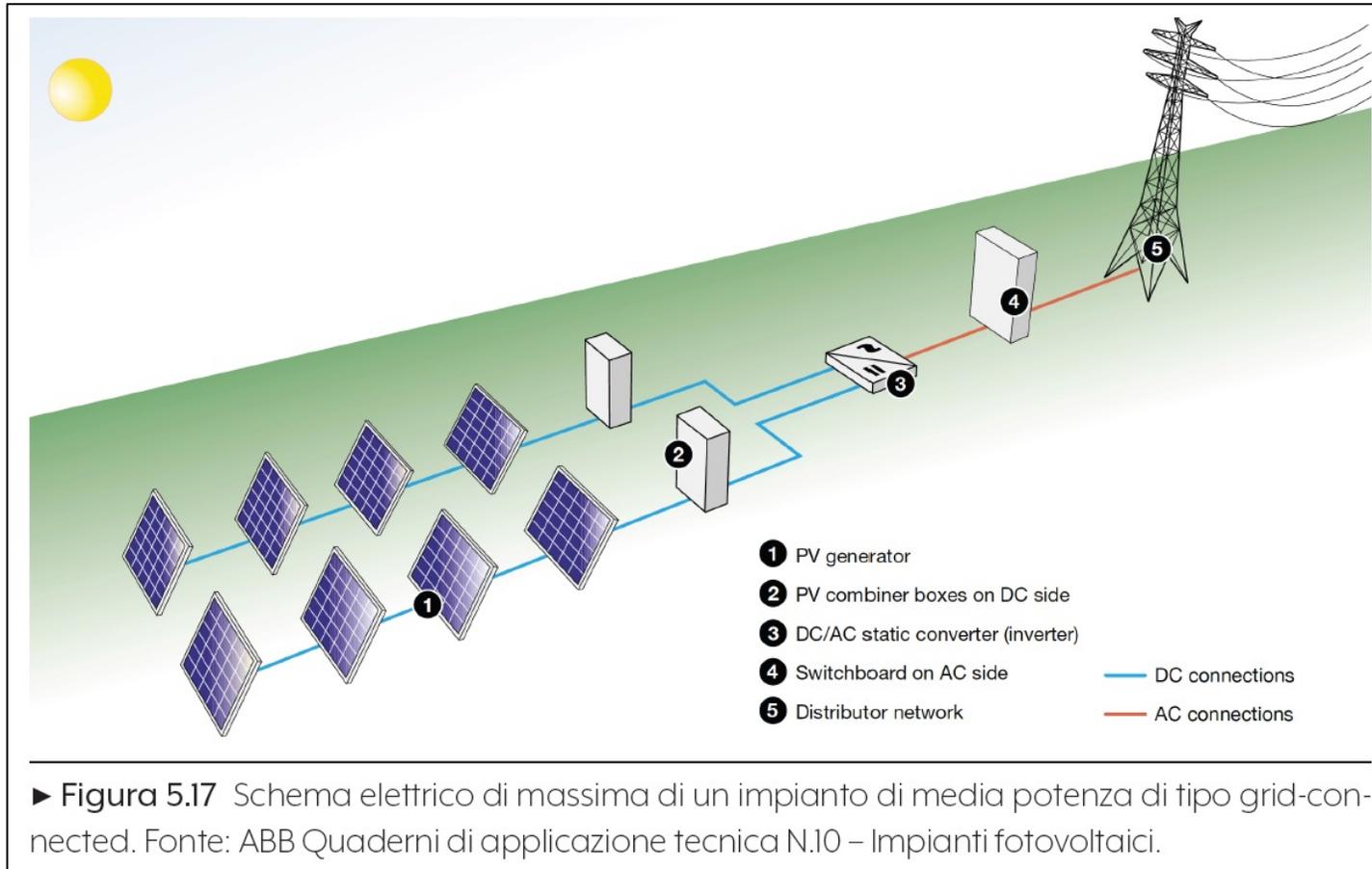
Collegamento dei pannelli

- 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



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)



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)

Influenza di una esposizione non ottimale sulla producibilità

Condizione di esposizione ottimale per un impianto fisso a Padova

Orientation/Tilt	0°	15°	36°	45°	60°	90°
South	-14.2%	-4.7%	0%	-1.2%	-6.5%	-33.1%
SE-SW	-14.2%	-7.7%	-5.3%	-7.1%	-13.0%	-36.1%
East-West	-14.2%	-15.4%	-20.1%	-23.1%	-30.2%	-50.1%
NE-NW	-14.2%	-23.7%	-37.9%	-44.0%	-53.3%	-70.1%
North	-14.2%	-27.2%	-46.4%	-54.4%	-66.7%	-81.7%

Elaborazione risultati PVGIS riferiti a Padova

Tabella 5.2 Perdita di producibilità unitaria di un impianto in funzione della disposizione dei pannelli fotovoltaici (orientazione e inclinazione, con riferimento ad un sito a Padova).

La disposizione orizzontale dei pannelli massimizza la potenza installabile in caso di copertura piana o terreno orizzontale

Perdita di producibilità di circa il 14%

Nelle installazioni civili e industriali in aree non montate, sono frequenti le coperture con angolo di inclinazione 15°

Perdita di producibilità intorno al 15% in caso di falde Est/Ovest

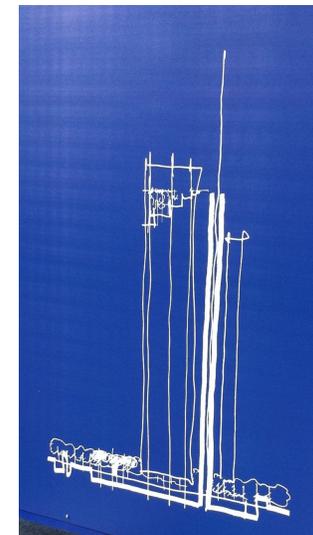
Perdita di producibilità inferiore a 5% se i pannelli sono orientati verso Sud

Influenza di una esposizione non ottimale sulla producibilità

Condizione di esposizione ottimale per un impianto fisso a Padova

Orientation/Tilt	0°	15°	36°	45°	60°	90°
South	-14.2%	-4.7%	0%	-1.2%	-6.5%	-33.1%
SE-SW	-14.2%	-7.7%	-5.3%	-7.1%	-13.0%	-36.1%
East-West	-14.2%	-15.4%	-20.1%	-23.1%	-30.2%	-50.1%
NE-NW	-14.2%	-23.7%	-37.9%	-44.0%	-53.3%	-70.1%
North	-14.2%	-27.2%	-46.4%	-54.4%	-66.7%	-81.7%

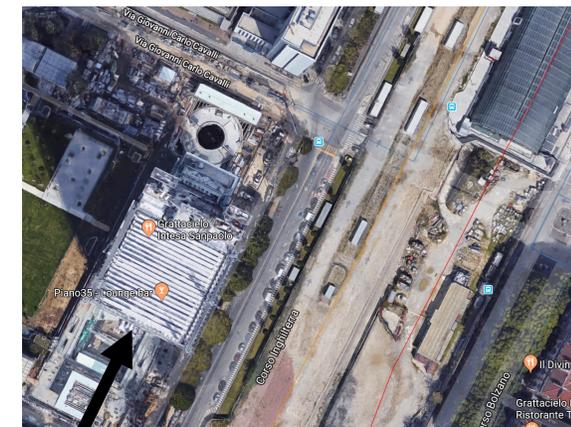
► Tabella 5.2. Perdita di producibilità unitaria di un impianto in funzione della disposizione dei pannelli fotovoltaici (orientazione e inclinazione, con riferimento ad un sito a Padova).



La disposizione verticale è ancora accettabile in caso di orientazione di +/- 45° rispetto alla direzione Sud

Perdita di producibilità di circa il 1/3

Viene privilegiata la produzione invernale (radiazione solare bassa sull'orizzonte)



Ombreggiamenti sistemati

- Le cause di ombreggiamento possono essere
 - **Esterne**
 - **Interne**
 - Ingombro su superficie orizzontale di un impianto fotovoltaico, in funzione di
 - Tecnologia di conversione (rendimento)
 - Tipo di impianto (su unica falda o con pannelli disposti su più filari)

	Rendimento di pannello	Impianti su falda $S_{orizz}/S_{FV} = 1$	Impianti di grandi dimensioni su più filari $S_{orizz}/S_{FV} = D/L$
Silicio monocristallino ad alto rendimento	fino al 22%	4,5 – 5 m ² /kWp	10 – 12 m ² /kWp
Silicio policristallino	15 – 18%	5,5 – 7 m ² /kWp	13 - 16 m ² /kWp
Silicio amorfo	5 – 8 %	12,5 – 20 m ² /kWp	27 – 48 m ² /kWp
CdTe	10 – 12 %	8,5 – 10,5 m ² /kWp	20 – 25 m ² /kWp
CIS	9 – 12 %	8,5 – 11,2 m ² /kWp	20 - 27 m ² /kWp

► Tabella 5.3

Valutazione preliminare dell'area richiesta per l'installazione di un impianto fotovoltaico in funzione della tecnologia di conversione utilizzata.

Limiti della tecnologia fotovoltaica

- Estensione degli impianti fotovoltaici
 - Densità della fonte primaria (irraggiamento standard 1 kW/m^2)
 - Rendimento di conversione (circa 20% per applicazioni terrestri)
 - Ombreggiamenti tra filari
- Andamento della produzione su base giornaliera e stagionale



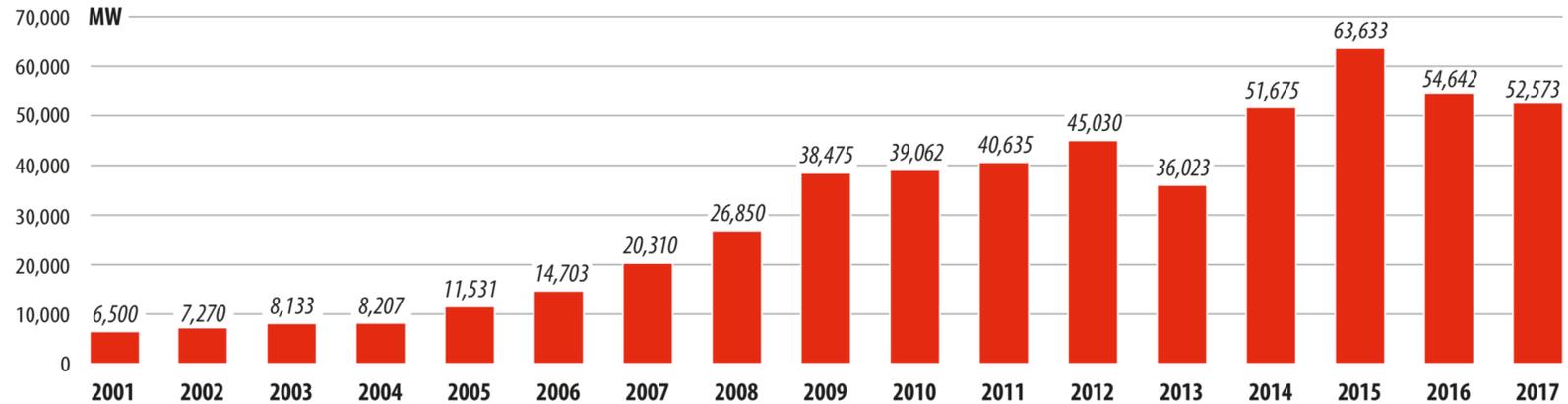
- Stabilità di rete



100 MW \rightarrow circa 120 MWh/anno
 \rightarrow circa 1.000.000 $\text{m}^2 = 1 \text{ km}^2$

L'evoluzione mondiale del settore eolico

GLOBAL ANNUAL INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017

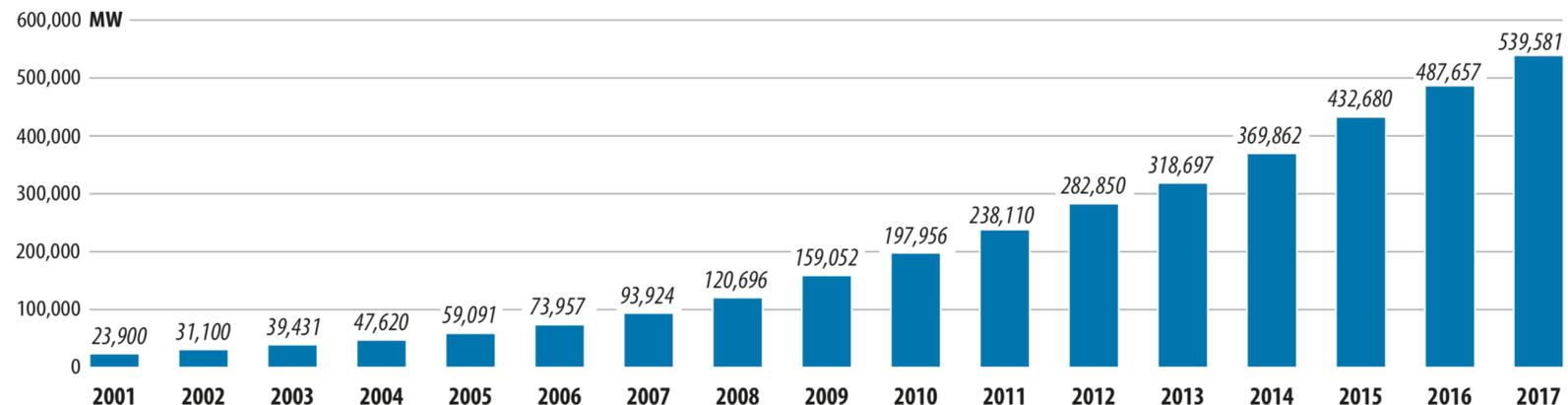


Source: GWEC

Potenza installata annualmente

- Forte espansione nella prima decade del 2000
- Crescita grossomodo costante negli ultimi anni

GLOBAL CUMULATIVE INSTALLED WIND CAPACITY 2001-2017

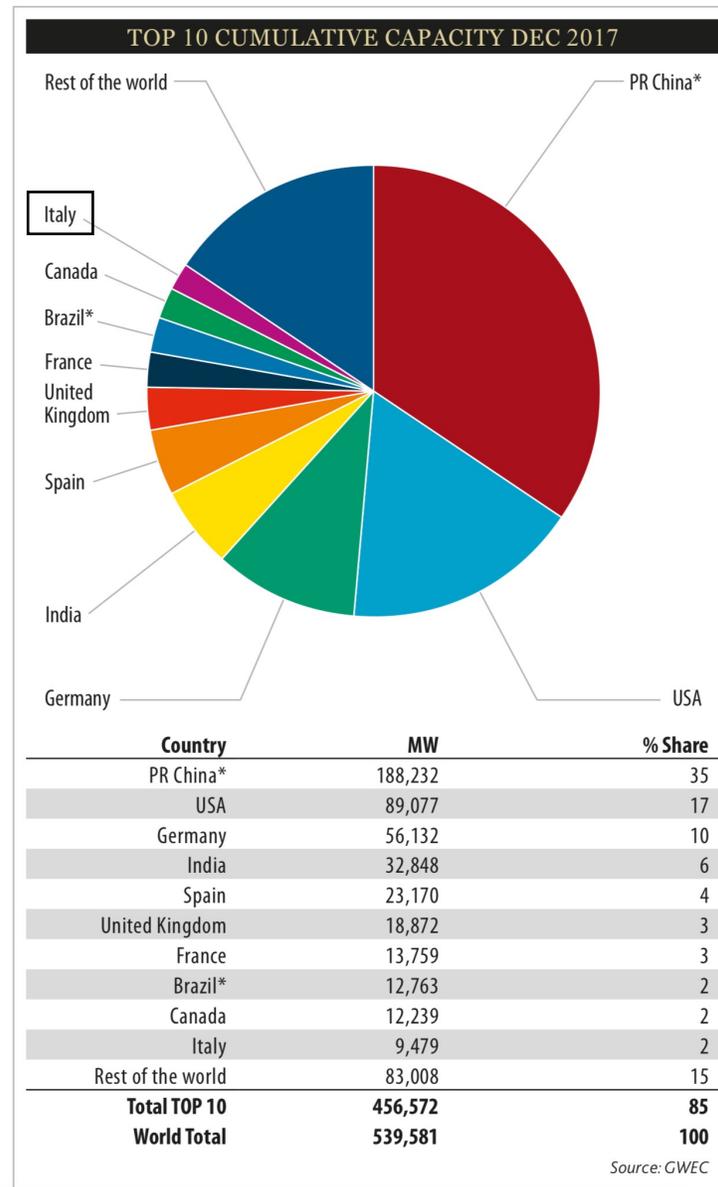
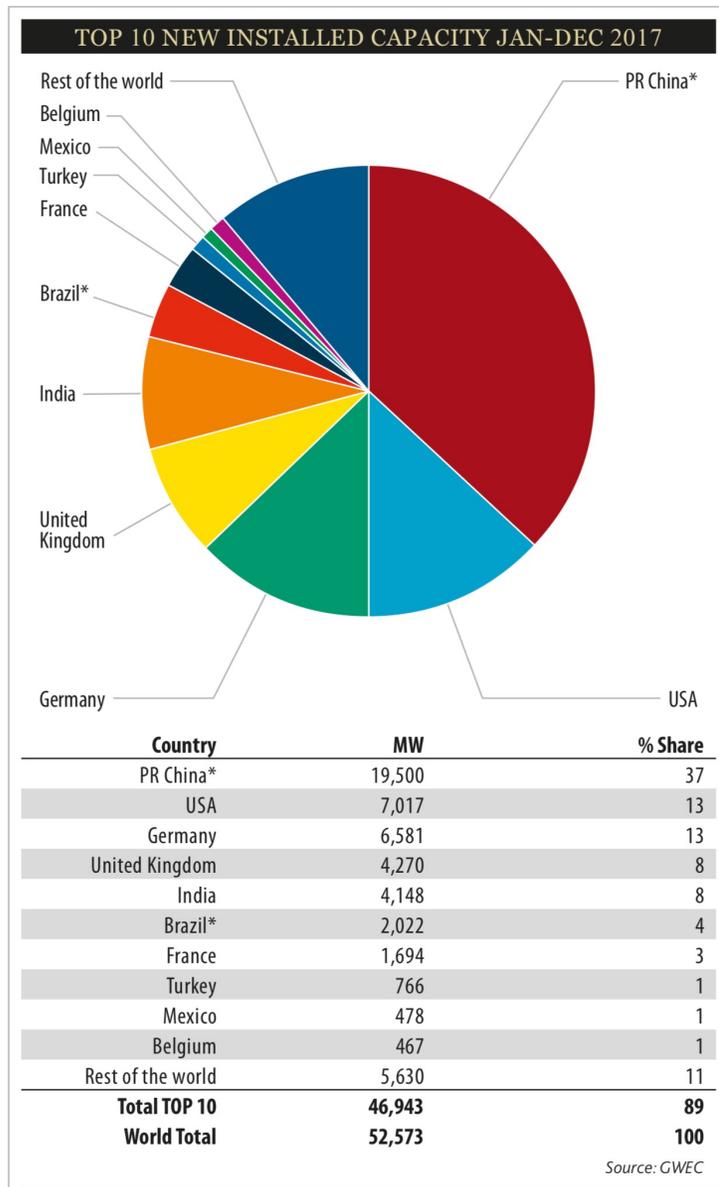


Source: GWEC

Potenza installata cumulata a dicembre 2017

- Il settore è ancora in crescita
- La potenza installata è ancora superiore a quella fotovoltaica (~400 GW) → Diverso trend di crescita atteso
- La producibilità unitaria dell'eolico è maggiore di quella del fotovoltaico → $E_{wind} > E_{FV}$

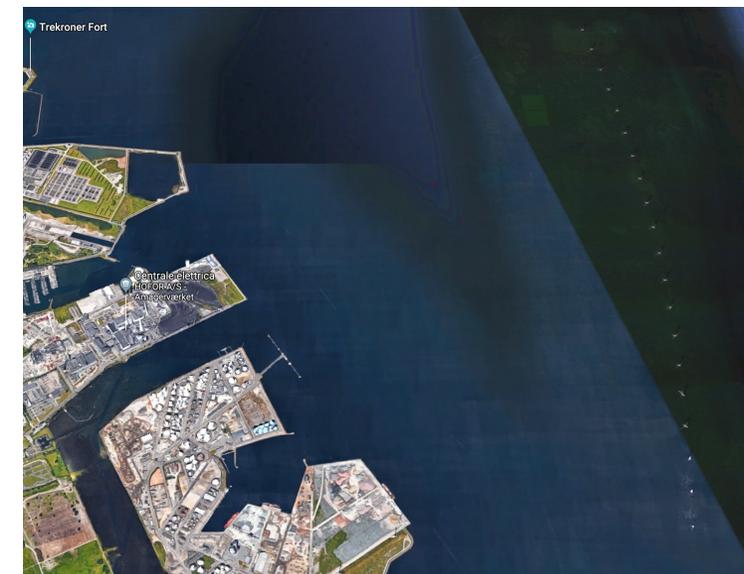
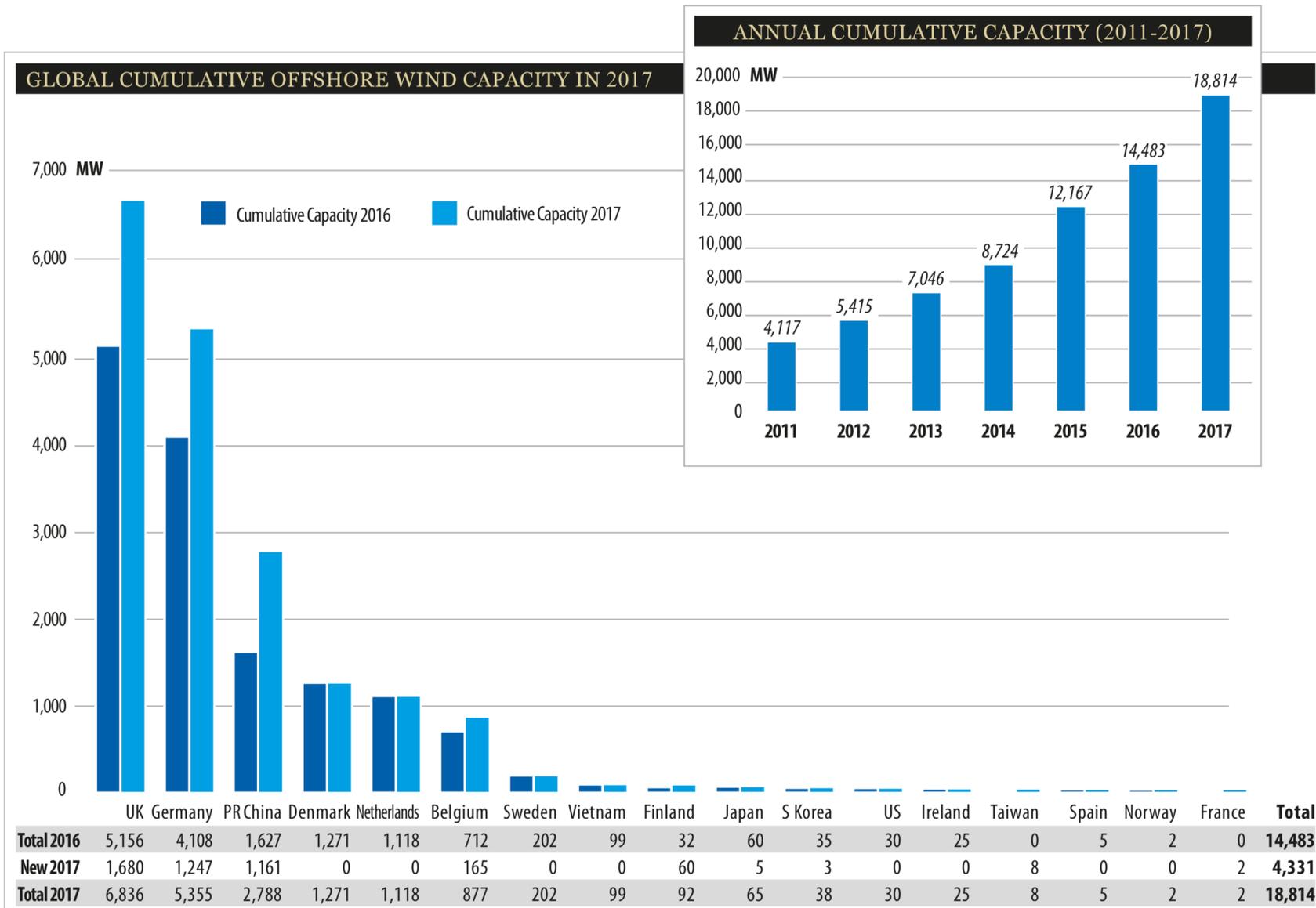
L'evoluzione mondiale del settore eolico



- Distribuzione territoriale della potenza installata
 - Nel 2017 (sx)
 - Cumulata a dicembre 2017 (dx)
- Confrontando 2017 e cumulato, non si notano disomogeneità elevate
 - Sviluppo più omogeneo del settore nel tempo (ad esempio rispetto al FV)
 - Maggiore maturità industriale del settore eolico rispetto ad altri

85% della potenza installata mondiale è allocata in 8 paesi

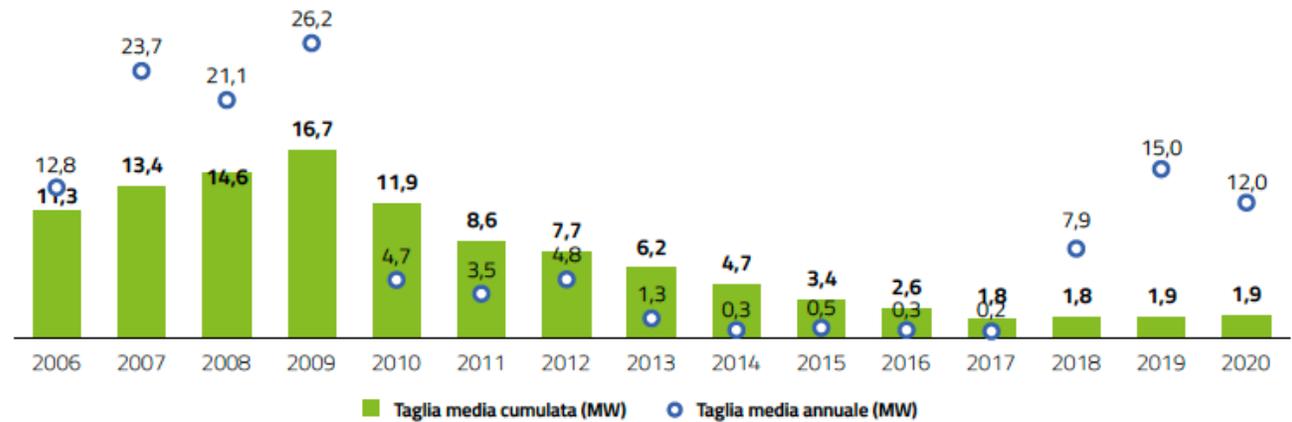
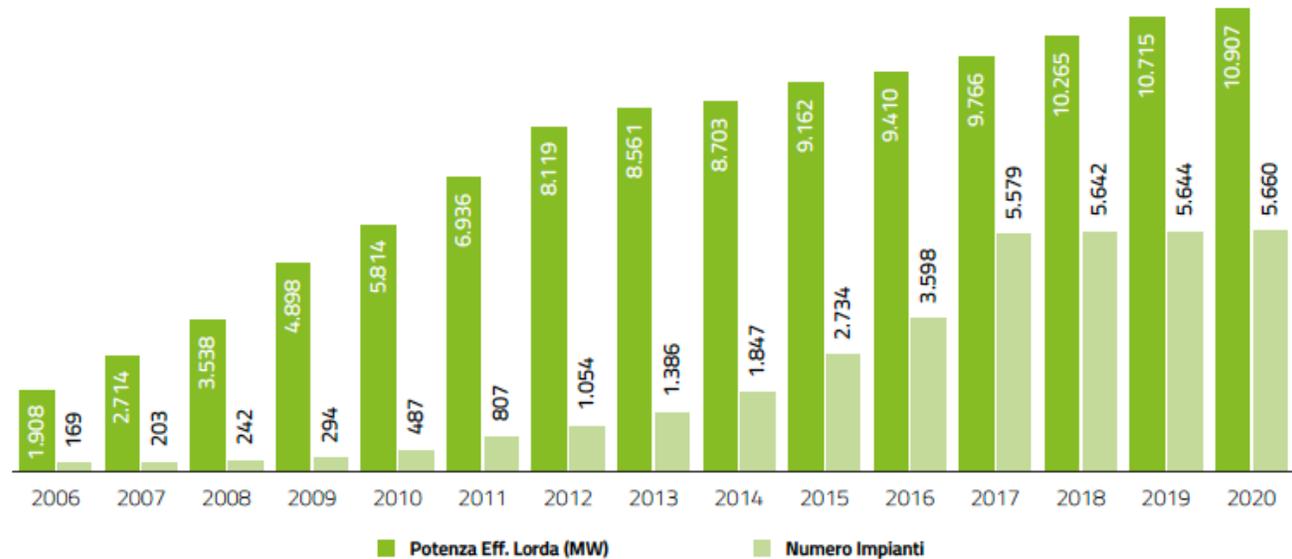
L'evoluzione mondiale del settore eolico – settore off-shore



Source: GWEC

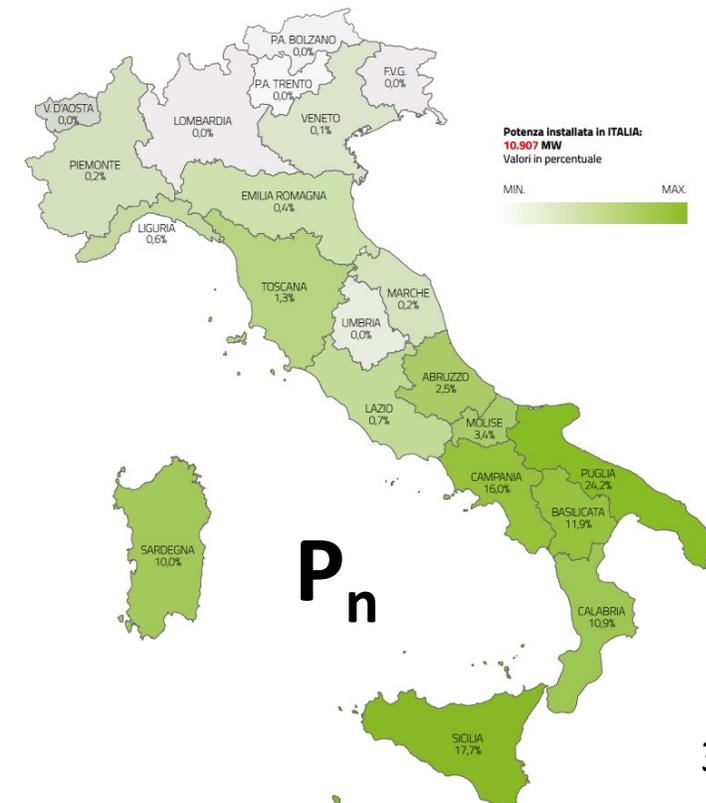
L'evoluzione italiana del settore eolico

- Evoluzione del settore in Italia dai primi anni 2000
- La taglia media degli impianti è aumentata a ridosso della fine della prima decade, per poi ridursi anche in modo significativo (quasi un ordine di grandezza)
- Ripresa la tendenza a crescere della taglia degli impianti negli ultimi anni
- A fine 2020 la potenza eolica installata (**10.9 GW**) rappresenta il 18,3% dell'intero parco rinnovabile installato (56.6 GW)
- Nel 2020 l'energia prodotta da eolico (**18.8 TWh**) rappresenta il 16.% dell'intera produzione rinnovabile (116.9 TWh)



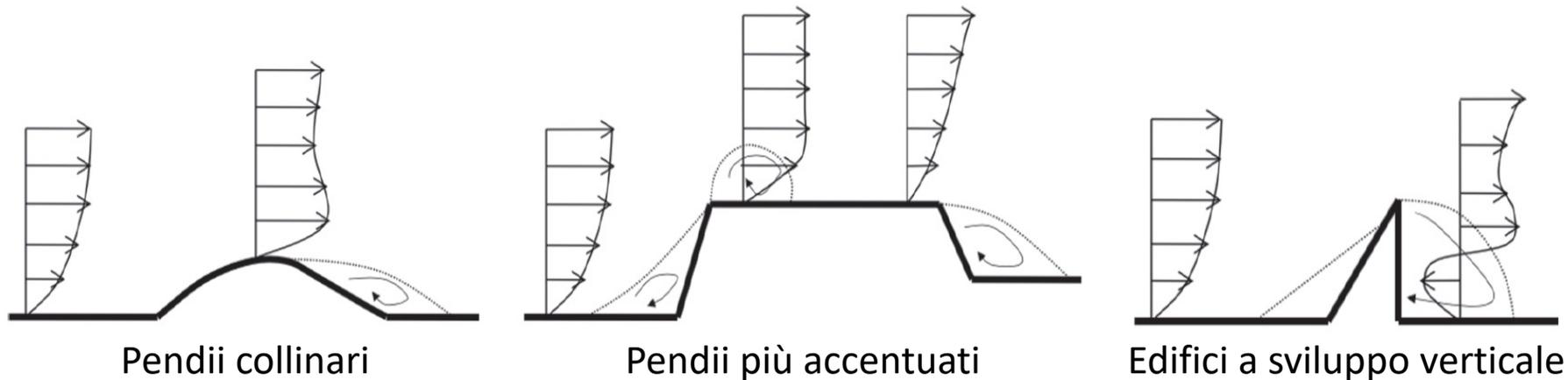
L'evoluzione italiana del settore eolico

- In termini di potenza installata, gli impianti realizzati sono prevalentemente di grande taglia (>10 MW), quindi connessi alla rete di trasmissione Terna (AT/AAT) → $P_{n,media,AT} = 30 \text{ MW}$
- Non si sono registrate particolari agevolazioni nella autorizzazione e realizzazione degli impianti
 - La localizzazione degli impianti è conseguente alla disponibilità di energia primaria
- Gli impianti sono prevalentemente finalizzati alla completa immissione di potenza in rete
 - Gli impianti sono tipicamente allocati in contesti isolati
 - Gli strumenti di incentivazione premiavano l'immissione in rete e non la produzione



Sfruttamento della fonte primaria

- L'energia eolica ha **peculiarità specifiche** rispetto alla altre fonti rinnovabili
 - **Fotovoltaico**: l'energia primaria solare è nota con buona accuratezza (database storici di radiazione solare) e la caratterizzazione del sito è possibile con un dettagliato sopralluogo (es. ombreggiamenti)
 - **Eolico**: necessaria una caratterizzazione puntuale del sito, anche per mezzo di misure estese nel tempo
 - I database disponibili tendono a essere meno dettagliati rispetto a quelli relativi alla radiazione solare
 - L'installazione di dispositivi di rilevamento è meno agevole (necessario monitorare il vento alla quota di rotore) → Dispositivi anemometrici con strutture di dimensioni significative
 - Necessario caratterizzare l'effetto di ostacoli, barriere e incanalamenti (non solo nelle immediate vicinanze del sito in analisi)



Caratterizzazione della fonte eolica

- Quando un sito è potenzialmente interessante?

- Aspetti da considerare

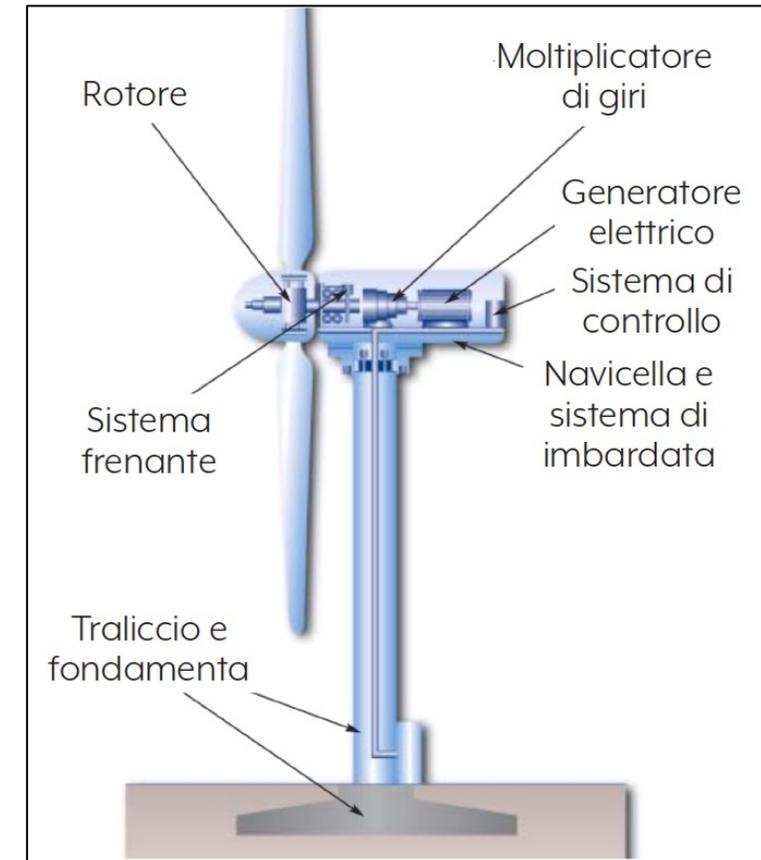
- Prezzi della tecnologia
- Costi di sviluppo dell'impianto (indagine iniziale, conseguimento del titolo autorizzativo, sviluppo del cantiere e della connessione alla rete)
- Tariffe di mercato e relativo outlook (andamento atteso di domanda e offerta, valori di chiusura del mercato, partecipazione ad altri mercati)
- Eventuali forme di incentivazione o altra agevolazione (es. priorità di dispacciamento sul mercato)
- Poco appetibili siti con ventosità inferiore a 2.000-2.200 MWh/MW annui (durata di funzionamento equivalente alla potenza nominale pari a 2.000-2.200 h/anno)
- La disponibilità primaria deve essere dimostrata da una opportuna campagna anemometrica sul campo, su un intervallo temporale opportunamente esteso (alcuni anni)

Classificazione degli impianti eolici

- Tipologia di rotore

- Rotori ad asse orizzontale

- Navicella e sistema di imbardata. Contiene gli organi principali, sia di potenza che di controllo. Il sistema di imbardata può essere meccanico-idraulico (torri di grande taglia) o semplicemente aerodinamico (pinna nei piccoli impianti)
- Traliccio e fondamenta. Le fondazioni dipendono sostanzialmente dal tipo di terreno e di installazione (in-land o off-shore), possibilità di torri galleggianti
- Rotore con pale in fibra di vetro o fibra di carbonio (grandi installazioni), in metallo o in materiale plastico (torri di piccola potenza). Regolazione del passo delle pale (pitch control) per ottimizzare il rendimento di conversione o frenare intenzionalmente le macchine
- Sistema frenante: dispositivo per limitare la velocità di rotazione in presenza di forti raffiche. È sempre previsto almeno un dispositivo meccanico per l'arresto in caso di emergenza
- Moltiplicatore di giri: è richiesto nelle applicazioni non completamente disaccoppiate dalla rete elettrica, per limitare il numero di coppie polari statoriche



Classificazione degli impianti eolici

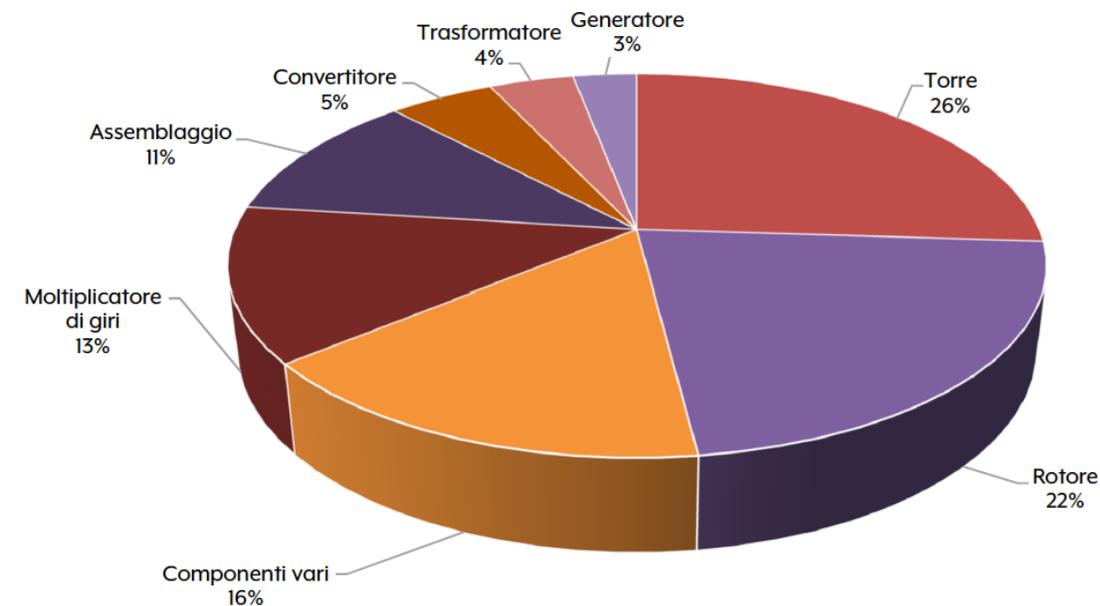
- Tipologia di rotore

- Rotori ad asse orizzontale

- Generatore elettrico: generatore asincrono a velocità ~costante, generatore asincrono con alimentazione delle correnti rotoriche, generatore direct drive
- Sistema di controllo: gestisce l'impianto nelle sue funzioni operative (controllo della potenza, regolazione del passo, ecc.) e di sicurezza

Richiedono una valutazione ad-hoc i costi per l'ancoraggio a terra della torre (tipologia di suolo) e i costi di connessione alla rete

Potenza nominale	4.5 MW	Massa della torre (struttura tubolare in acciaio)	220 t
Numero di pale	3	Altezza della torre (in dipendenza dalle condizioni locali del vento)	90-120 m
Diametro del rotore	120 m	Diametro della torre alla base	5.5 m
Controllo	inclinazione della pala e velocità variabile	Velocità di rotazione del rotore	9-15 giri/min
Lunghezza della pala	58 m	Rapporto del moltiplicatore di giri	100-1
Corda massima della pala	5 m	Velocità del vento di avviamento della turbina	4 m/s
Massa di una pala	18 t	Velocità del vento nominale	12 m/s
Massa della gondola con rotore a pala	220 t	Velocità del vento di arresto della turbina	25 m/s



Ripartizione percentuale del costo di una torre eolica di grande taglia, per i componenti più onerosi

Conversione di energia eolica → meccanica

- P è massima se $a = 1/3$ (a è fattore di interferenza)
- La massima potenza eolica convertibile in meccanica è pari a

$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho \pi R^2 v_1^3$$

- Estrahendo la formula della potenza eolica del tubo di flusso, è possibile esplicitare il rendimento di conversione, definito **coefficiente di performance c_p**

$$P = c_p \left[\frac{1}{2} \rho \pi R^2 v_1^3 \right] = c_p P_{wind}$$

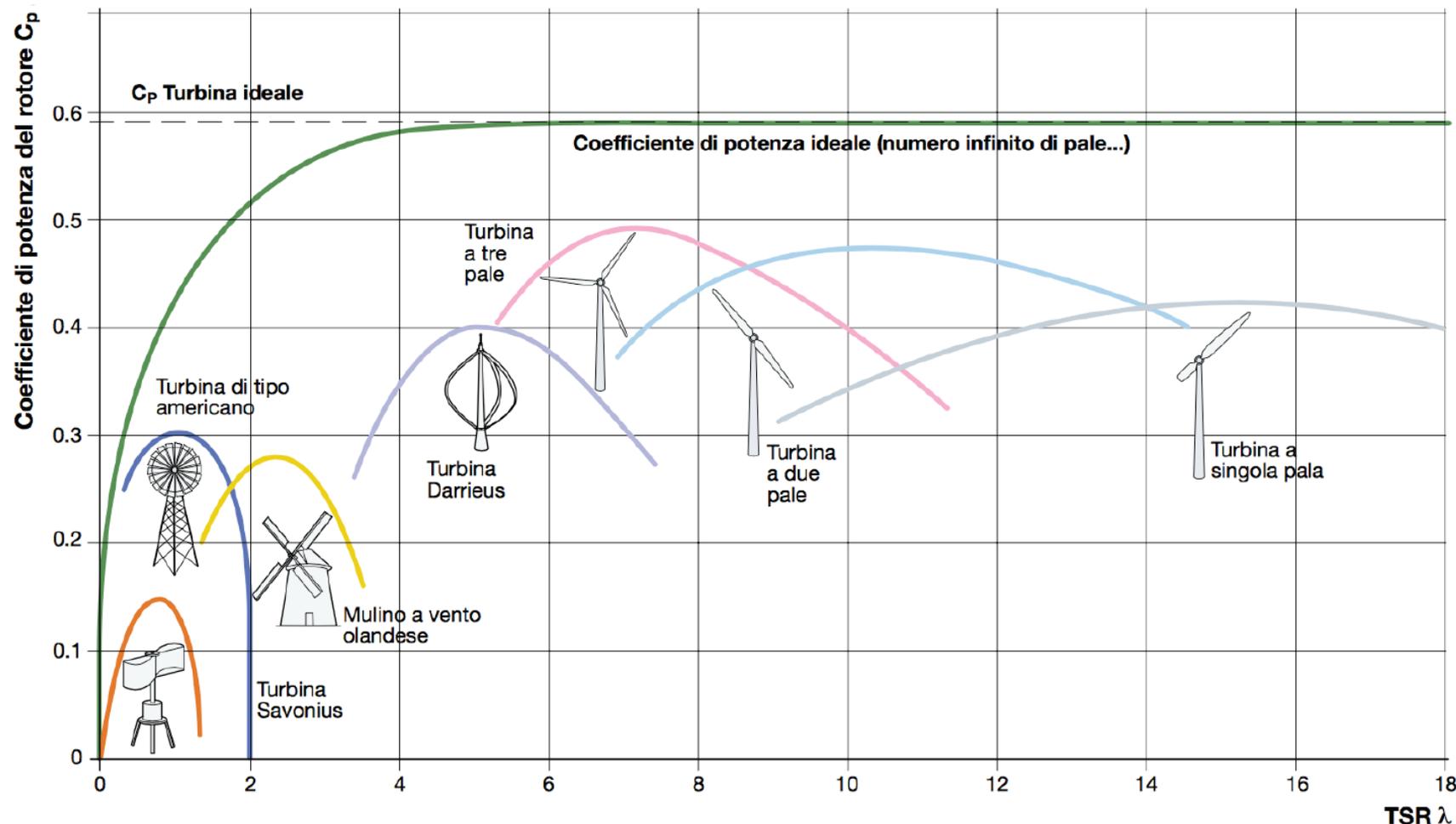
- Esiste un **valore massimo teorico** del rendimento di conversione → $c_{p,max} = 16/27 = \mathbf{59,3\%}$
- Il valore effettivo del coefficiente c_p dipende da
 - Modalità costruttive del rotore
 - Presenza ed efficacia del sistema di regolazione del passo delle pale
 - Velocità di rotazione dell'albero dell'aerogeneratore
 - Velocità del vento

- I fenomeni di attrito e di turbolenza nel tubo di flusso (trascurate nel modello di Betz) riducono il valore di c_p effettivamente conseguibile rispetto al suo limite teorico

Dipendenza da v^3 →
Sono sfruttabili siti a ventosità costante, meglio se senza folate intense

Conversione di energia eolica → meccanica

- L'andamento di c_p è riportato in relazione al **Tip-Speed Ratio (TSR)**, ovvero al rapporto tra velocità tangenziale dell'estremo di una pala e la velocità del vento



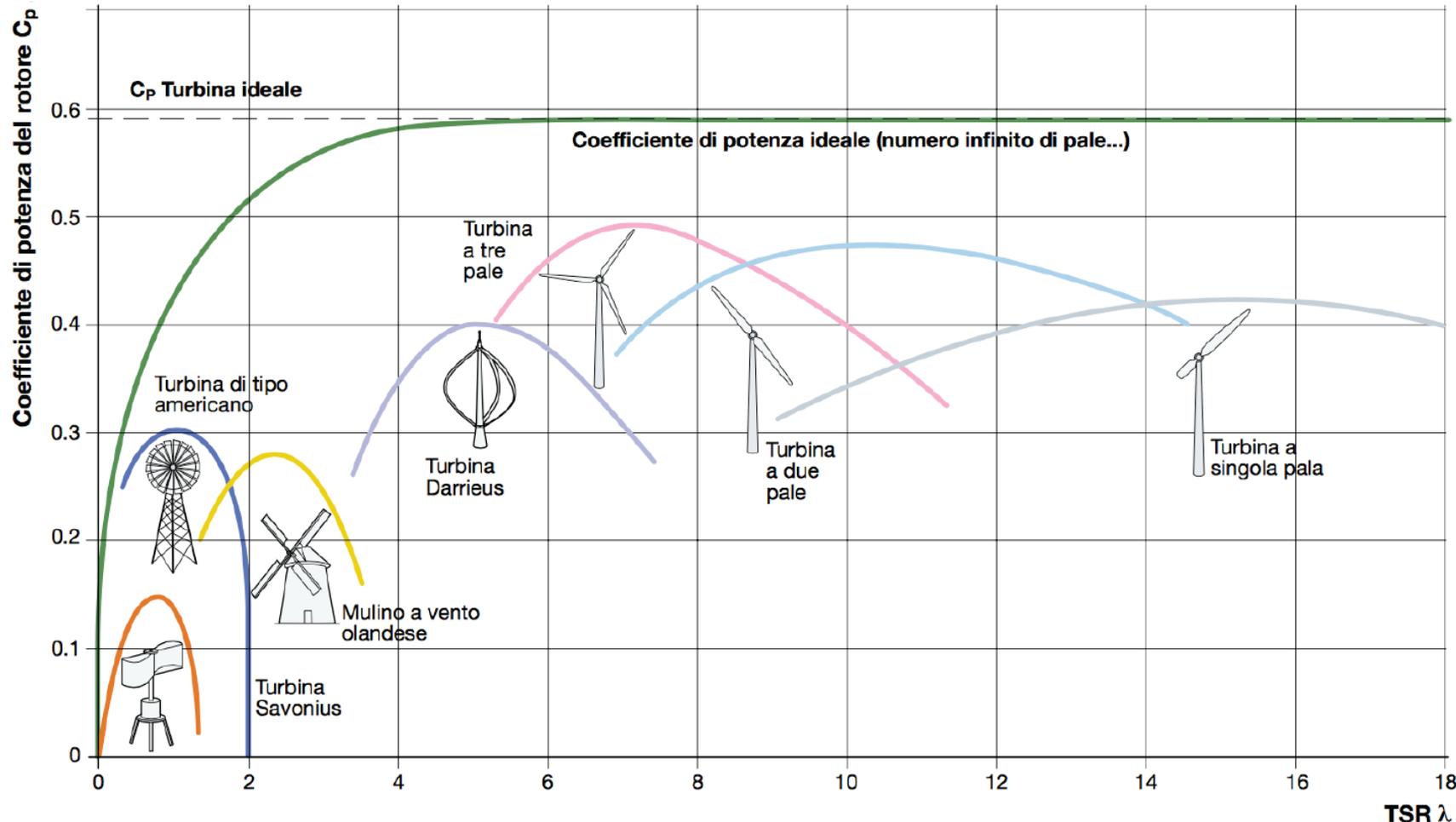
Se $TSR \uparrow$, sono richieste pale più robuste a causa delle elevate forze centrifughe agenti sull'intero rotore

Se $TSR \uparrow$, i livelli di rumorosità possono aumentare significativamente in condizioni di vento intenso

- $v = 25 \text{ m/s}$
- $TSR = 12$
- Velocità assoluta della punta delle pale (300 m/s) è prossima alla velocità del suono

Conversione di energia eolica → meccanica

- L'andamento di c_p è riportato in relazione al **Tip-Speed Ratio (TSR)**, ovvero al rapporto tra velocità tangenziale dell'estremo di una pala e la velocità del vento



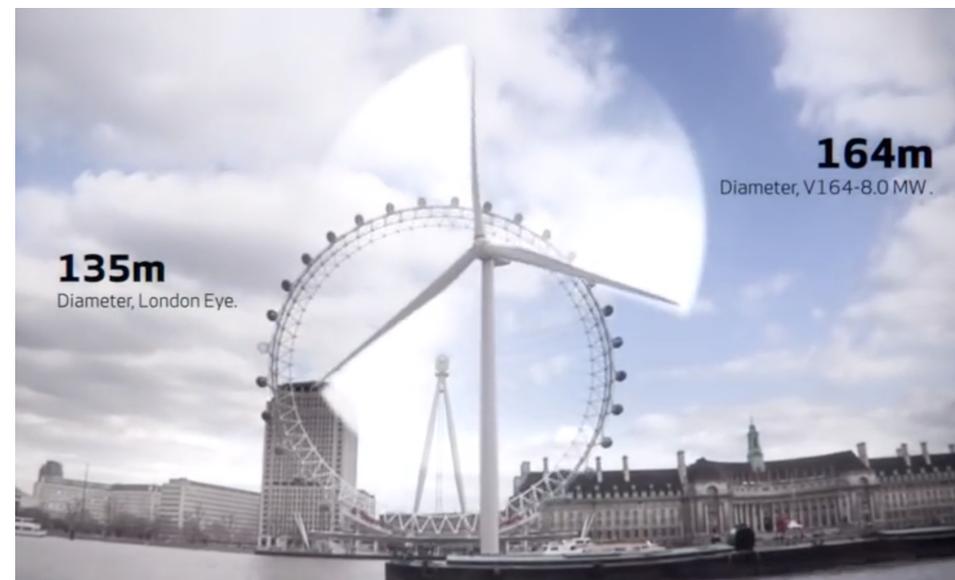
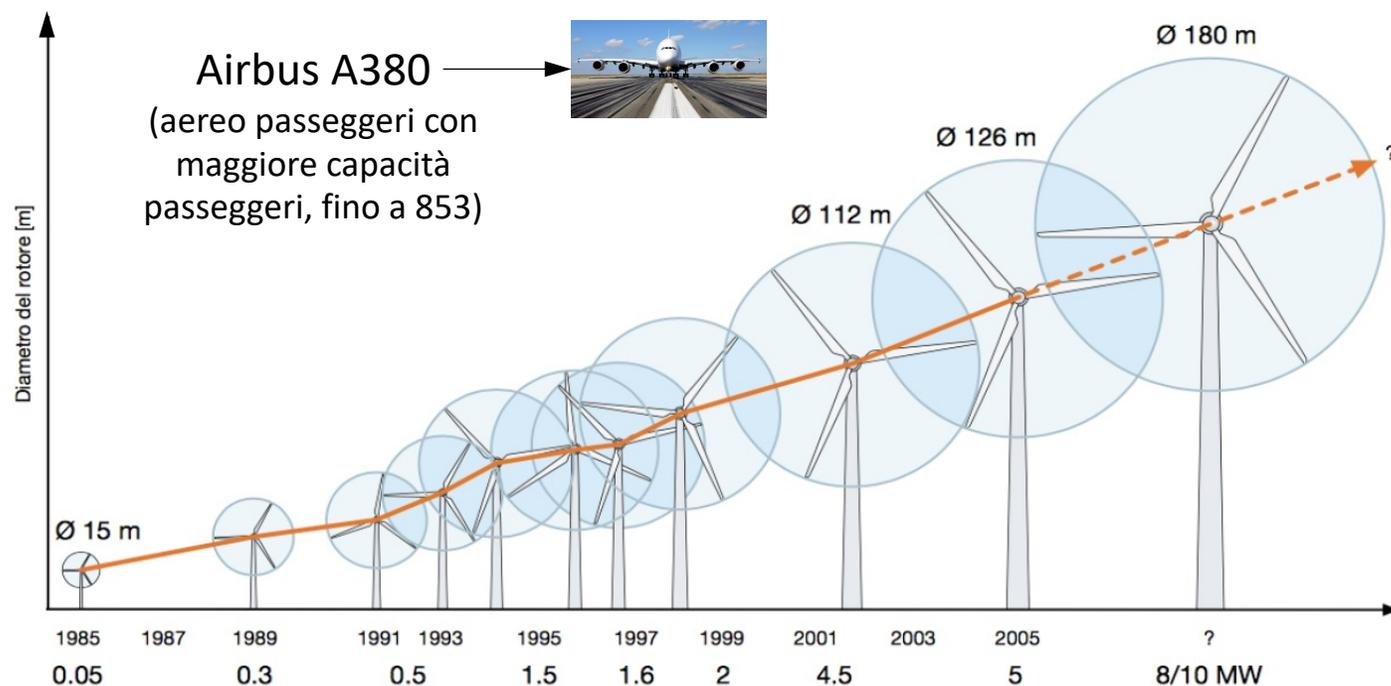
Tra le costruzioni ad asse verticale, i rotori a portanza (Darrieus) raggiungono c_p significativamente superiori ai rotori a resistenza

Tra le costruzioni ad asse orizzontale, la configurazione a 3 pale è ottimizzate per TSR nel range 6-9 (c_p vicino a 50%)

Configurazioni a due o una pala sono ottimizzate per TSR oltre 9 e oltre 14, rispettivamente

Conversione di energia eolica → meccanica

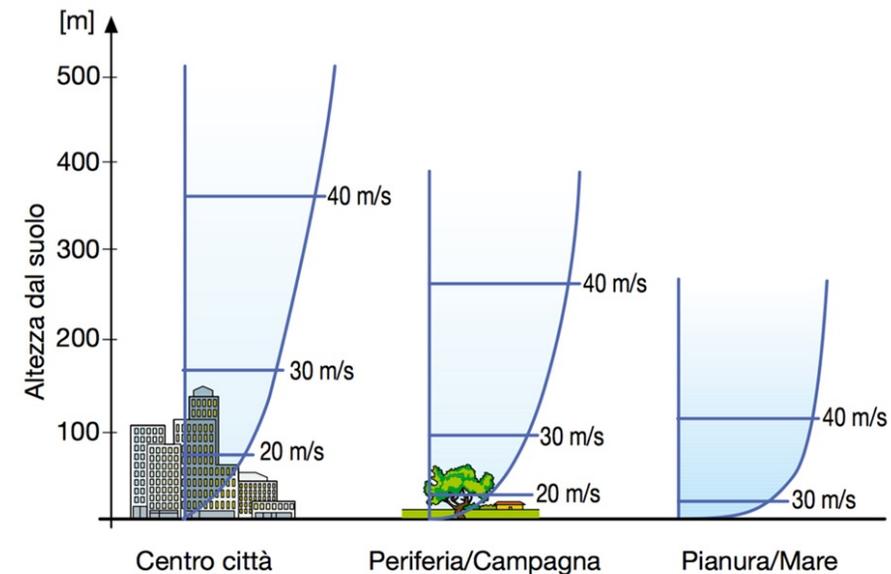
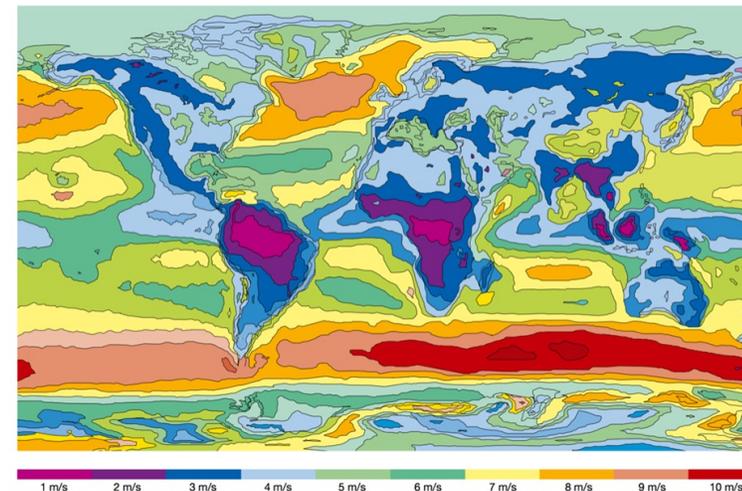
- Confermata la dipendenza lineare tra **area spazzata dal rotore** e potenza dell'aerogeneratore, a parità di velocità del vento
- Evoluzione tecnologica → Aumento significativo delle dimensioni delle torri (diametro e quindi altezza) → Aumento della potenza nominale dei singoli aerogeneratori
- Un aerogeneratore di taglia multi-MW ha un diametro del rotore ben superiore all'apertura alare di un aereo moderno per il trasporto di passeggeri da oltre 500 posti



Limiti allo sviluppo della fonte eolica

• Necessaria caratterizzazione del sito

- La caratterizzazione specifica del sito è necessaria e non banale
- Esistono solo indicazioni grossolane correlazione con le coordinate geografiche del sito (latitudine/longitudine)
- La caratterizzazione del sito richiede strumentazione adeguata in grado di misurare la risorsa primaria per un tempo sufficientemente esteso
 - Posizionamento dei misuratori il più possibile in condizioni prossime a quelle di installazione → Torri anemometriche con altezza di rilevazione pari a 50 m per evitare i fenomeni distorti che si manifestano vicino al piano nel terreno



Limiti allo sviluppo della fonte eolica

• Tempo di ritorno dell'investimento ed esposizione finanziaria

- È necessario uno studio accurato preliminare per la caratterizzazione della disponibilità della fonte primaria → Tempo lungo tra l'inizio della valutazione del sito (primi costi di sviluppo) e l'entrata in esercizio dell'impianto (primi ricavi di esercizio)
- Complessità degli iter autorizzativi ed elevata percentuale di mortalità in fase istruttoria
- Condizioni prossime alla grid-parity si possono ottenere solo in contesti molto ventosi, in parte già sfruttati (in Italia)
- La disponibilità eolica aumenta negli impianti off-shore, anche per effetto delle minori turbolenze generate dalle irregolarità del suolo
 - Necessario studiare il punto di trade-off tra maggiore producibilità unitaria conseguibile e costi aggiuntivi di costruzione (fondamenta, rete elettrica di connessione alla terraferma) e gestione
- Incertezze normative limitano l'interesse dei grandi investitori
 - Regime di incentivazione e agevolazione
 - In parte preponderante, modalità di autorizzazione degli impianti

Ingente esposizione finanziaria

(pochi soggetti in grado di affrontare tale investimento iniziale in modo sistematico)

Tempo di ritorno dell'investimento

e

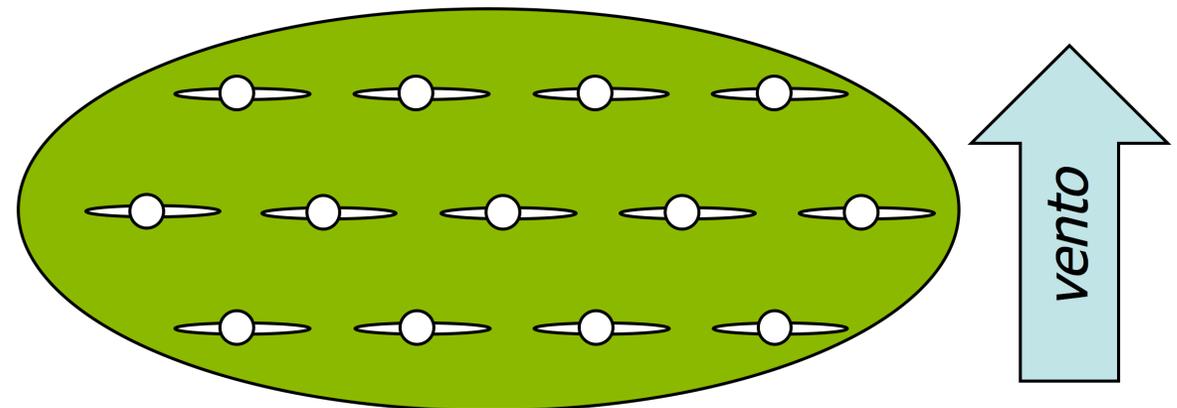
Profilo di rischio dell'investimento

(es. retroattività di provvedimenti normativi)

Limiti allo sviluppo della fonte eolica

• Occupazione del suolo

- In una installazione multi-torre è necessario non pregiudicare la producibilità unitaria dell'intero sito eolico per mutue interferenze tra singoli aerogeneratori
- Problema duale all'ombreggiamento sistematico per cause interne negli impianti fotovoltaici, è opportuno
- Necessario spaziare tra loro le torri sulla stessa fila e distanziare tra loro le varie file consecutive
 - Distanza tra aerogeneratori della stessa fila: >3-5 volte il diametro delle pale
 - Distanza tra file consecutive di aerogeneratori: >5-9 volte il diametro delle pale



Limiti allo sviluppo della fonte eolica

• Occupazione del suolo

- Area orizzontale lorda occupata da un impianto eolico può variare grossomodo tra 20 e 55 volte l'area complessiva dei rotori utilizzati, detta area spazzata dai rotori
- Si considera un aerogeneratore commerciale di potenza nominale 4,5 MW (diametro del rotore 112 m)
- Valori medi di spaziatura tra aerogeneratori
 - Un impianto eolico di grande taglia occupa circa 7-8 ettari per MW (un valore molto minore si ha con disposizione su unica fila, circa 1/7)
 - A titolo di confronto, la superficie richiesta da un impianto fotovoltaico realizzato con pannelli in silicio cristallino è inferiore a $\frac{1}{4}$ di questo valore
- È tuttavia opportuno ricordare che i terreni sottostanti un impianto eolico possono continuare ad essere sfruttati per altre lavorazioni (agricoltura o pastorizia)
- Nelle applicazioni off-shore, è necessario garantire l'assenza di interferenze con la viabilità nautica



Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- Impatto visivo

- È inevitabile una modifica del paesaggio adiacente
- L'efficacia di azioni mitiganti l'impatto visivo è piuttosto limitata (es. colorazione di torri, rotore e pale in modo da meglio contestualizzare l'impianto rispetto allo sfondo)
- La sensibilità all'impatto visivo è fortemente soggettiva
 - Tale analisi andrebbe riportata in una **valutazione professionale di impatto ambientale**, rapportando l'impatto visivo ad altre forme di inquinamento tra cui quello chimico, atmosferico, ecc.



Si percepisce meno l'impatto visivo della linea AT solo perché siamo più abituati a vederla?

Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- Impatto visivo

- È inevitabile una modifica del paesaggio adiacente
- L'efficacia di azioni mitiganti l'impatto visivo è piuttosto limitata (es. colorazione di torri, rotore e pale in modo da meglio contestualizzare l'impianto rispetto allo sfondo)
- La sensibilità all'impatto visivo è fortemente soggettiva
 - Tale analisi andrebbe riportata in una **valutazione professionale di impatto ambientale**, rapportando l'impatto visivo ad altre forme di inquinamento tra cui quello chimico, atmosferico, ecc.

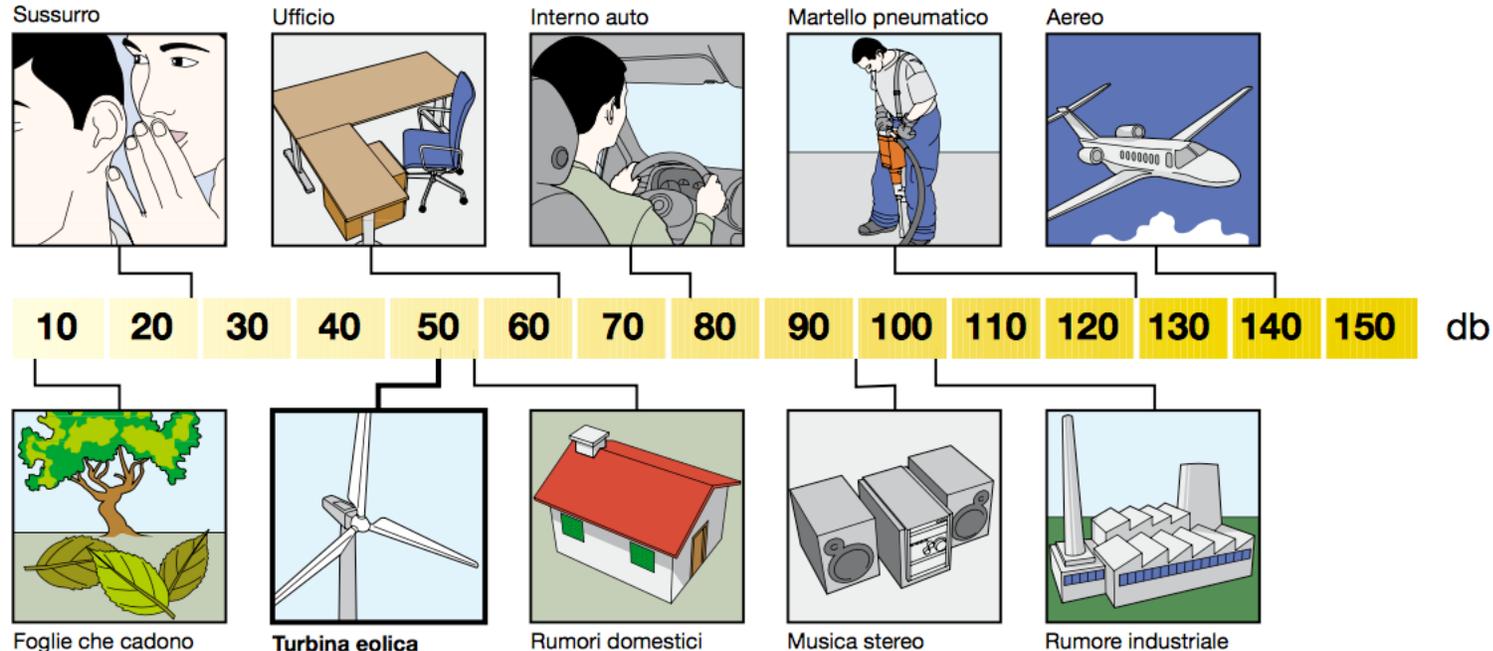


Si percepisce meno l'impatto visivo della zona industriale perché la riteniamo «inevitabile» in termini economici e lavorativi?

Limiti allo sviluppo della fonte eolica

• Impatto acustico

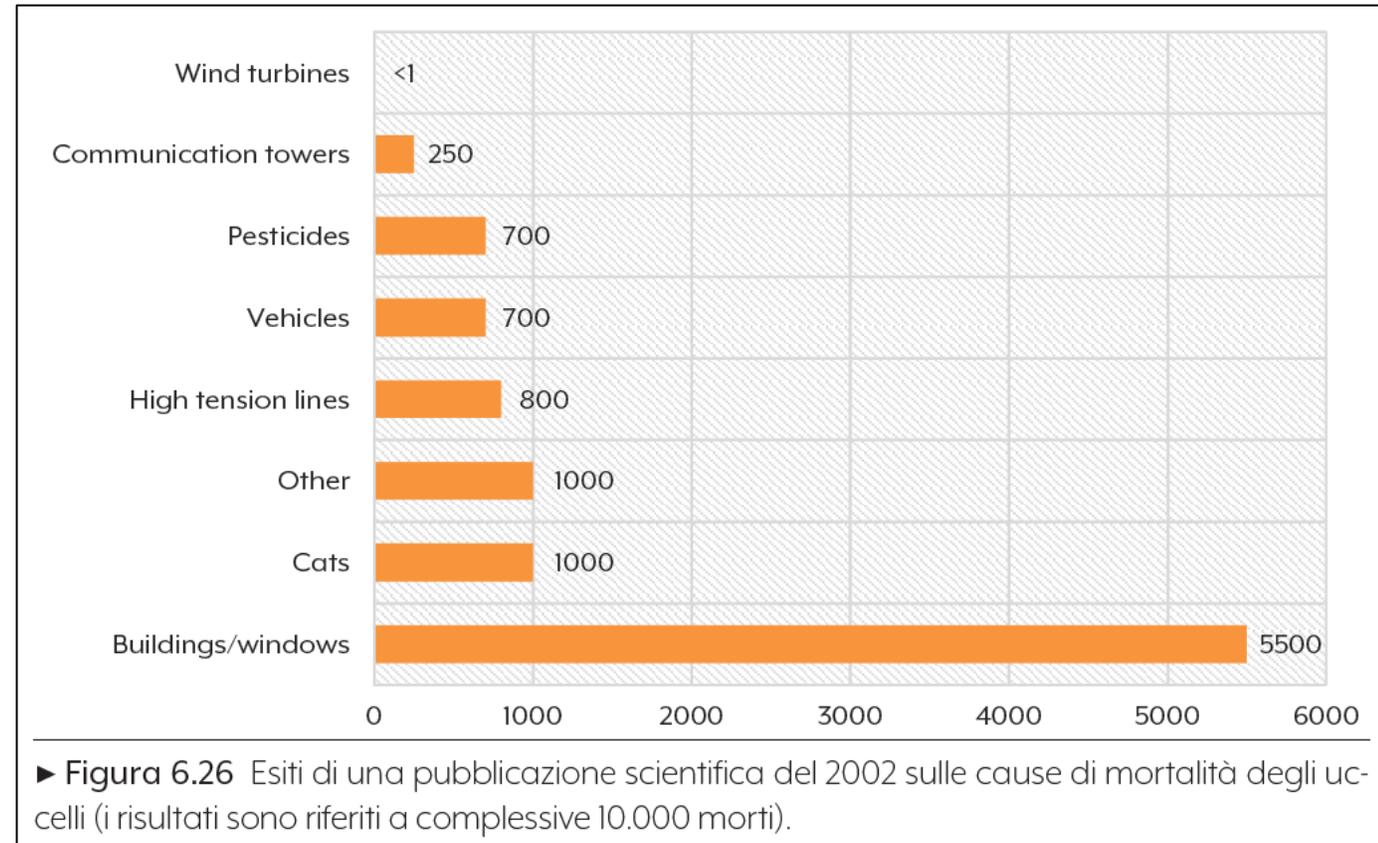
- In condizioni di forte vento (e aerogeneratore in movimento), alcune parti terminali delle pale possono portarsi a velocità periferiche prossime a quella del suono
 - Frenatura e blocco del rotore anche per limiti di tenuta strutturale
- In condizioni normali, il livello di inquinamento acustico va comparato con altre sorgenti che comunemente interferiscono con la condizione di quiete psico-fisica dell'individuo



L'intensità acustica (Intensity Level, IL) è il rapporto in dB fra il flusso di energia I e il flusso I_0 della soglia di udibilità (10^{-12} W/m^2)

Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- Interferenze con la fauna locale
 - In generale, la presenza di un impianto eolico non modifica in modo sostanziale le cause di mortalità della fauna avicola
 - Alcuni studi indagano le cause di morte degli uccelli, sia di tipo meccanico (urto) che chimico (inquinamento)
 - La percentuale di morte per urto su un aerogeneratore (pale, navicella o sostegno) è molto inferiore rispetto ad altre cause di mortalità comunque accettate
 - Opportuno verificare che non ci siano interferenze con la vita di specie protette o comunque tutelate



Limiti allo sviluppo della fonte eolica

- Impatto sulla rete elettrica

- Peculiarità della generazione eolica

- Elevata variabilità della produzione eolica come conseguenza della sua dipendenza con il cubo della velocità del vento → Variabilità molto maggiore rispetto ad un impianto fotovoltaico
 - Variabilità molto spinta sull'immissione di potenza in rete
 - Interventi tempestivi per la regolazione locale del sistema elettrico (in relazione ai suoi vincoli operativi e alla qualità del servizio da erogare agli utenti)
 - Bilanciamento istantaneo generazione/carico nel sistema complessivo

