

Le energie rinnovabili: solare, eolico, moto ondoso in applicazioni onshore ed offshore

Prof.ssa Valeria CASSON MORENO

Dipartimento di Ingegneria Civile ed Industriale

Università di Pisa

valeria.cassonmoreno@unipi.it



UNIVERSITÀ DI PISA

Sintesi dei contenuti

1) Per ogni fonte rinnovabile oggetto del seminario
(solare, eolico, energia marina)

- Dispositivi per la conversione dell'energia rinnovabile in energia elettrica
- Valutazione dell'energia potenziale un sito
- Come scegliere i dispositivi adatti al sito
- Valutazione dell'energia elettrica producibile

2) Confronto tra tecnologie onshore ed offshore

3) Integrazione delle RES

- Esempio di applicazione

Generalità sulla produzione di energia

Fonti di energia

Le principali fonti di energia attraverso le quali possiamo produrre energia sono:

- **Combustibili fossili**
- **Energia nucleare**
- **Energia idroelettrica**
- **Energia solare**
- **Energia eolica**
- **Energia geotermica**
- **Energia mareomotrice**
- **Biomasse**

Per definizione, le fonti di **energia non rinnovabile** sono quelle che si esauriscono con una scala temporale paragonabile a quella umana, ovvero i combustibili fossili (petrolio, carbone, gas naturale).

Si definiscono **energie alternative** tutte le fonti di energia che possono essere impiegate in sostituzione all'energia chimica prodotta dai combustibili fossili.

All'interno di questo insieme, si definisce **energia da fonti rinnovabili** (renewable energy sources, **RES**) quella da fonti che non si esauriscono o si esauriscono in tempi lunghi rispetto alla scala temporale antropica.

Fonti rinnovabili

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf



Wind power is a **renewable** energy source that uses turbines to convert wind onshore and offshore to electricity.



Solar power is a **renewable** energy source that uses sunlight through photo-voltaic cells (PV) or a set of mirrors and lenses to concentrate a large area of sunlight onto a receiver (concentrated solar power) to create electricity.



Hydropower is a **renewable** energy source that covers a wide array of technologies harnessing the forces of the natural water cycle.



Geothermal is a **renewable** energy source produced from heat inside the earth's crust. It can be used to generate electricity or used as a direct heat source.



Biomass is a **renewable** energy source made from biological source materials, which can include solid biomass, sewage biomass, forest residues, algae and agricultural wastes.



Nuclear power plants convert atomic energy into usable power. Conventional nuclear power plants produce heat to drive a turbine for electricity generation. Nuclear plants can provide heat for urban district heating and industrial processes.



Natural Gas is a **fossil** fuel commonly burned to produce heat to operate a steam turbine. It also has other uses in heat, cooking, industries, transport.



Coal is a solid **fossil** fuel commonly burned to operate a steam turbine to generate electricity and heat.



Carbon Capture, Use and Storage (CCUS) is the process of capturing carbon dioxide (CO₂) emissions from fossil power generation and industrial processes for storage deep underground or re-use. This technology can be combined with coal, natural gas and biomass.



Hydrogen is a bulk chemical that is used primarily today in petroleum refining and in the production of ammonia (for fertilisers) and methanol. In the future, hydrogen could be used as an energy carrier and energy storage medium.



Electricity and the process of making the energy system electric through electrification is seen as key to the rapid rollout of renewable energy sources.



Electricity Storage is the capture of energy to use later and includes lithium-ion batteries, dispatchable-hydrogen assets, and pumped-storage hydropower. In future, long duration energy storage could include developments in mechanical, thermal, electrochemical, and chemical storage.



Energy efficiency aims to use less energy to provide the same useful output for required energy needs.

Transizione energetica

Tra le varie strategie per la **decarbonizzazione** (ovvero il processo di riduzione del rapporto carbonio-idrogeno nelle fonti di energia al fine di evitare, a seguito di un processo di combustione, l'emissione di CO₂), la **transizione energetica** è una strategia volta alla progressiva riduzione dell'utilizzo dei combustibili fossili a favore delle **RES**.

Questa strategia è favorita da 3 aspetti chiave, di natura tecnica ma anche socio-politica:

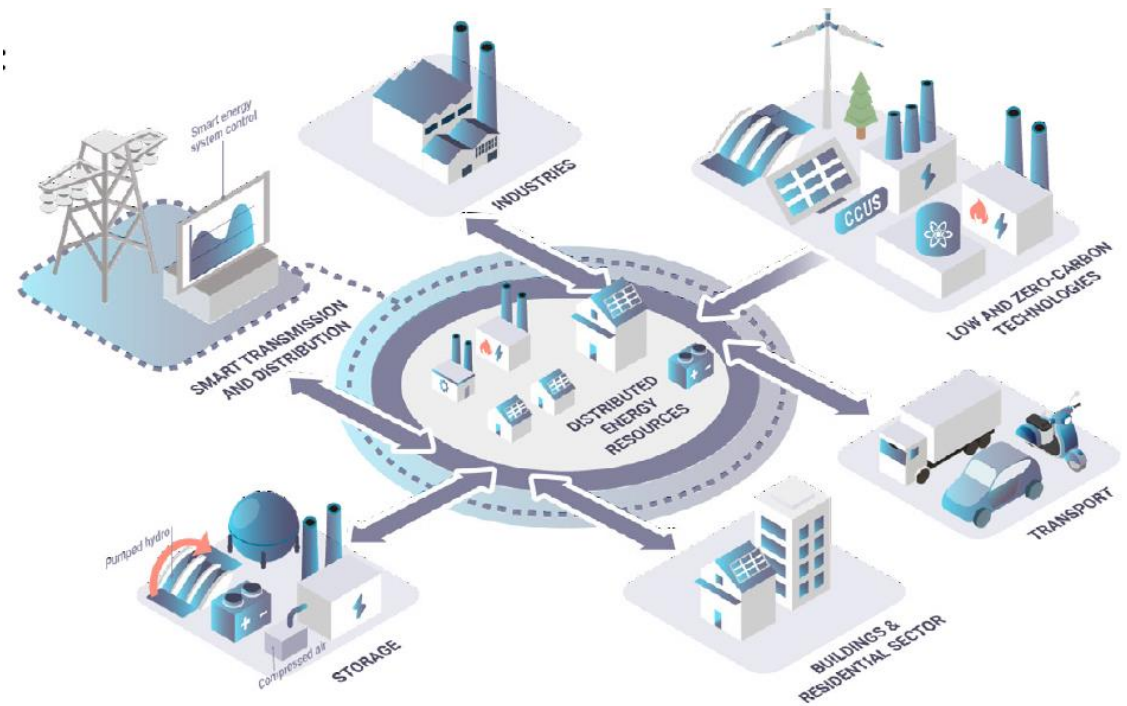
1. Limitare il riscaldamento globale
2. L'esaurimento delle fonti fossili, ma anche gli aspetti di convenienza economica legati allo sfruttamento degli stessi, che dipende da
 - Limiti naturali
 - La domanda crescente di energia
3. La distribuzione delle fonti fossili nel mondo e la conseguente instabilità di approvvigionamento in base alle condizioni socio-politiche locali.

NB: ad oggi si stima che ogni persona consumi l'equivalente di 13 barili di petrolio all'anno, ovvero 1.7MWh.

Transizione energetica

I punti su cui spinge l'Europa per raggiungere la neutralità carbonica nei sistemi di produzione dell'energia sono:

- Combinare tecnologie esistenti e nuove attraverso **sistemi integrati**;
- **Puntare su tecnologie intrinsecamente caratterizzate da basse / zero emissioni**;
- Interconnettere i sistemi energetici in modo che non ne esistano di isolati;

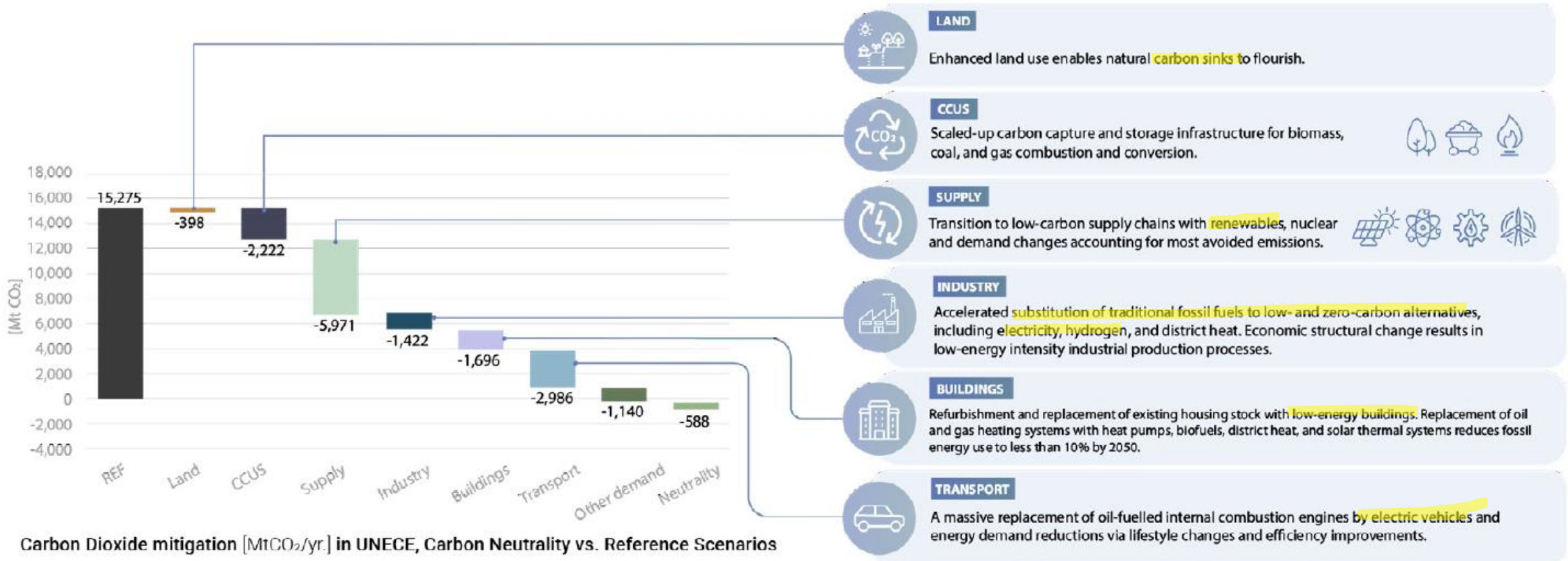


https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf

Transizione energetica

Cosa dovrebbero fare i diversi settori?

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf

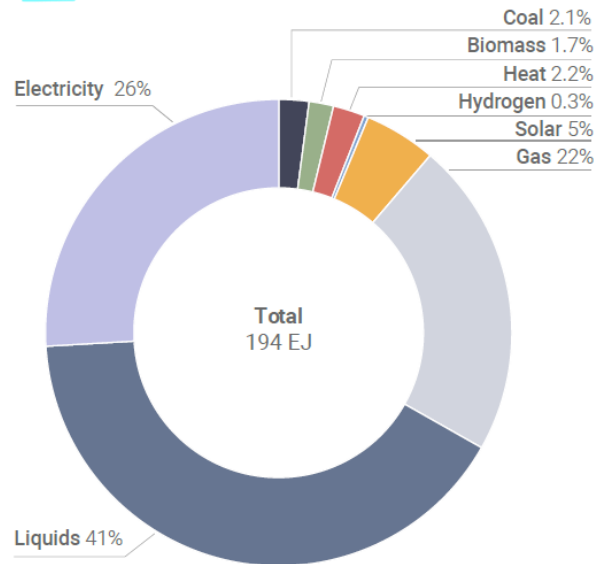


Transizione energetica

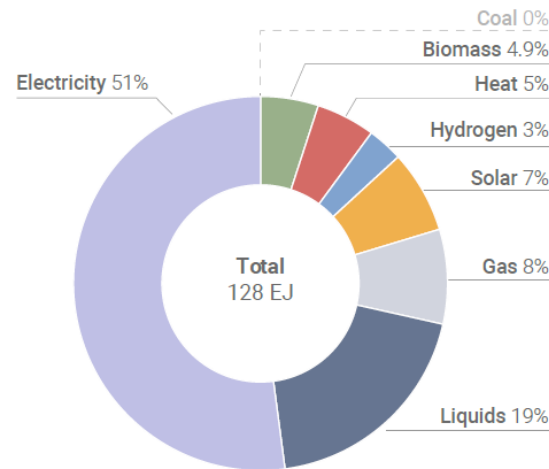
Quale fonte di energia è la chiave?

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf

Diversifying and innovating resource base to attain resilient energy systems is the key



Reference Scenario
Final Energy Supply 2050



Carbon Neutrality Scenario
Final Energy Supply 2050

* **Reference Scenario** is based on historical trends and current policies.

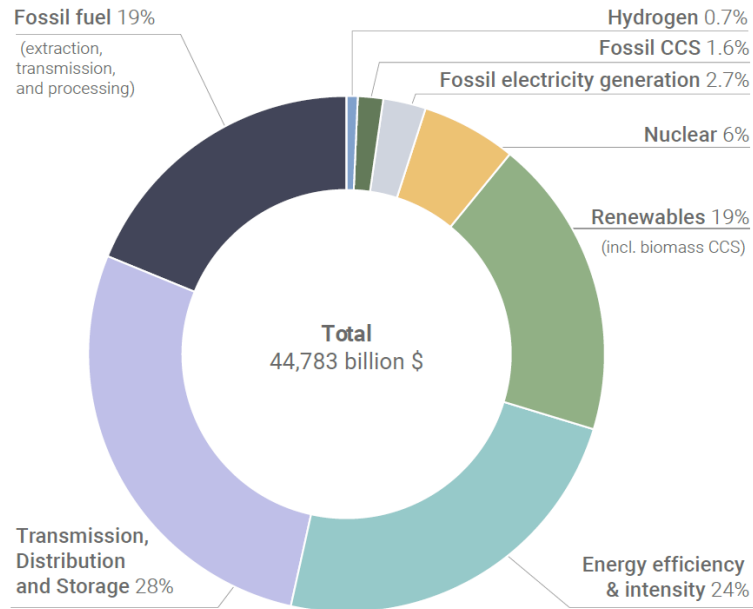
* **Carbon Neutrality Scenario** reaches net-zero carbon emissions by 2050 and aims to limit temperature rises to less than 1.5°C by 2100.

Transizione energetica

How much will the transition to net-zero cost?

44,783 billion \$

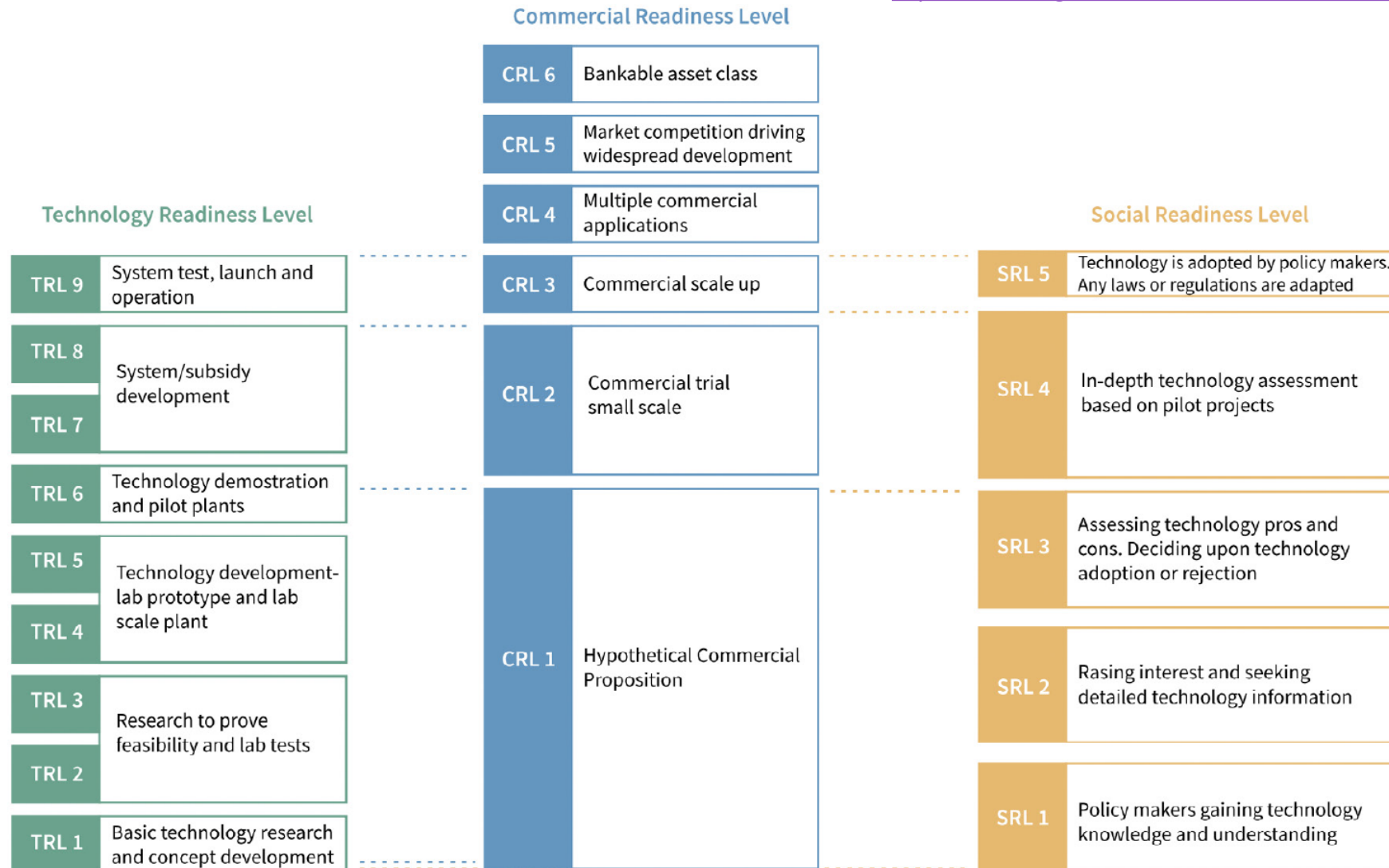
https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf



Carbon Neutrality Scenario
Total Investment needs 2050

Stato di avanzamento delle RES

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf



Stato di avanzamento delle RES

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf

Technology	Required by 2050 in UNECE Region	Compound average growth rate 2020-2050 (%)	Equivalent	Technology Readiness Level	Commercial Readiness Level	Social Readiness Level
 Wind	500,000 wind turbines with a capacity of 2,240 GW generating 6,750 TWh	Capacity: 6.4% Generation: 7.6%	Eleven million tonnes of steel, or 6% of the 2020 global steel production.			
 Solar	7 million utility-scale panels with a total capacity of 2,650 GW generating 4,430 TWh	Capacity: 8.6% Generation: 9.5%	2.8 million football pitches of solar panels equal to the surface area of Belgium(0.07%) of the whole UNECE region.			
 Hydropower	Expanding hydropower capacity to 720 GW generating 2,500 TWh	Capacity: 1.4% Generation: 1.5%	Adding net 250 GW, the equivalent of 13 Three Gorges Dams.			

Sfide poste dalle RES

https://unece.org/sites/default/files/2022-09/Technology%20Interplay_final_2.pdf

La transizione energetica deve avvenire tenendo presente i seguenti vincoli:

1. Sicurezza dell'approvvigionamento
2. Convenienza dell'energia
3. Sostenibilità dei sistemi energetici

**L'implementazione e integrazione delle RESs
nei sistemi di approvvigionamento
energetico possono aiutare a superare
queste criticità**

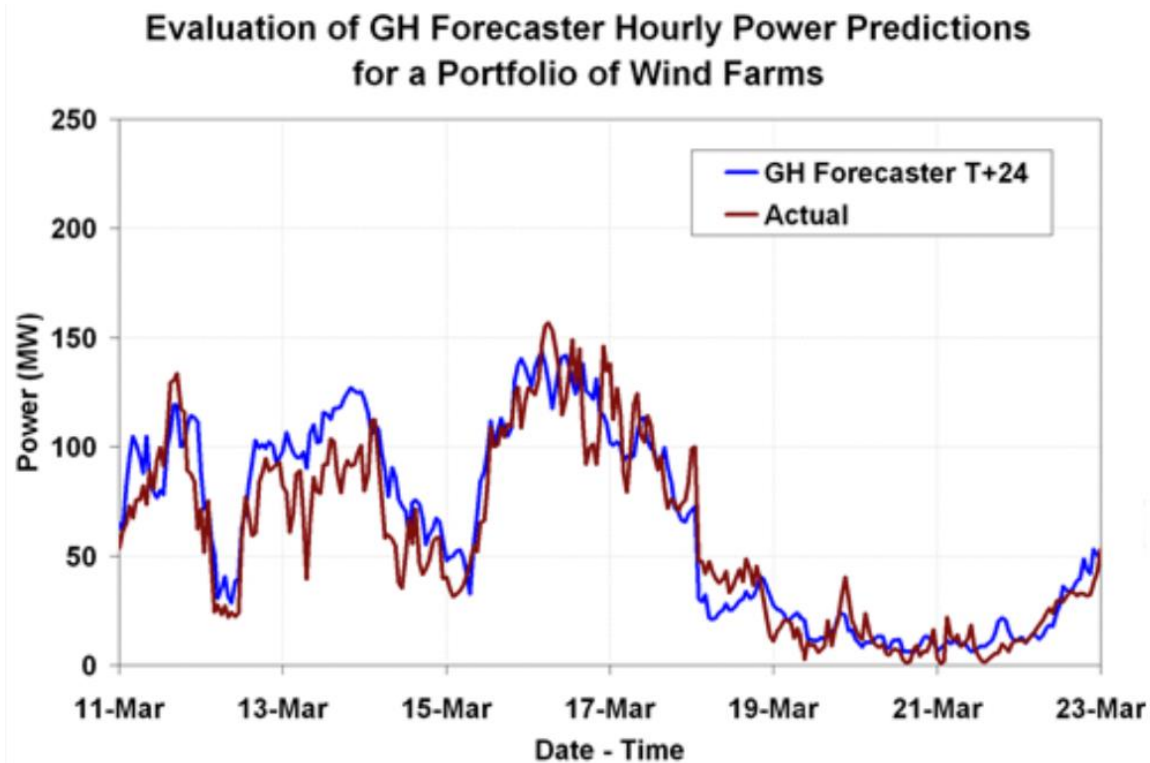
Tuttavia anche l'implementazione ed integrazione delle RESs comportano delle sfide, legate alle caratteristiche intrinseche di queste fonti energetiche:

1. **ALTA VARIABILITA'**
2. **DIFFICILE PREVEDIBILITA'**



Sfide poste dalle RES

1. ALTA VARIABILITA'
2. DIFFICILE PREVEDIBILITA'

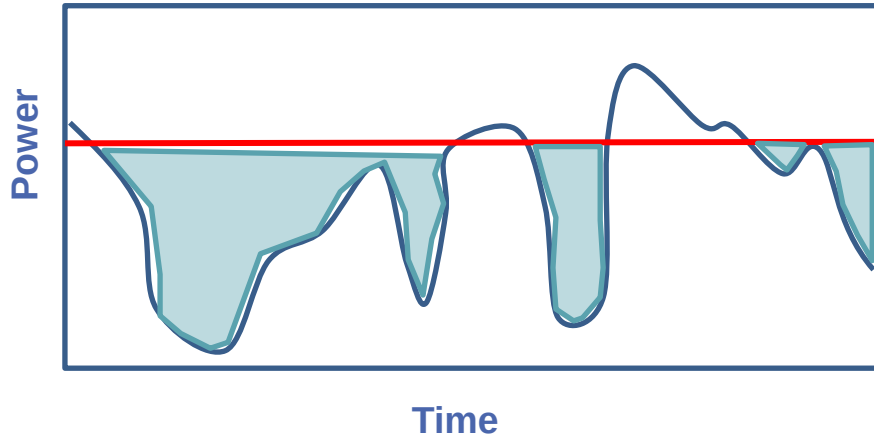


Source: Garrad Hassan

<https://www.wind-energy-the-facts.org/portfolio-effects.html>

Sfide poste dalle RES

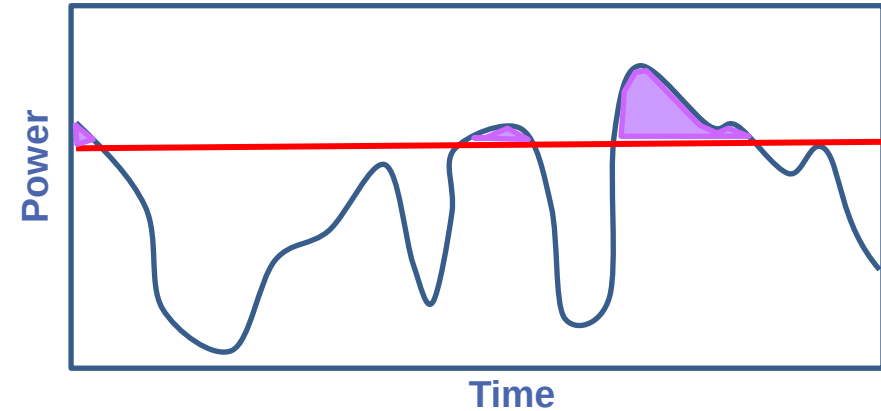
Possibili situazioni:



Si ha una **mancanza** di potenza prodotta rispetto ad una **richiesta fissata**, ad esempio per mantenere un processo allo stazionario o perché è necessario se siamo connessi alla rete elettrica nazionale.

VALLEY FILLING

per compensare la mancata produzione



Si ha un **surplus** di potenza prodotta rispetto a quanto serve o a quanto dichiarato.
L'energia va dissipata o **stoccata**.

PEAK SHAVING

per non sprecare il surplus

Integrazione delle RES

Sono proprio queste due caratteristiche a rendere più complesso il processo di integrazione delle RES nei sistemi di approvvigionamento energetico. Questo è **particolarmente nel caso dell'industria**, dove è quasi sempre necessario avere un approvvigionamento **STAZIONARIO**.

Dal punto di vista pratico, diventano quindi importanti gli aspetti tecnologici riguardanti

- L'**ELETTRIFICAZIONE** delle operazioni unitarie del processo
- Lo **STOCCAGGIO** dell'energia

In particolare, la questione dello stoccaggio dell'energia prodotta da fonti rinnovabili apre tutta una serie di strategie per lo stoccaggio a lungo termine, che passano per la **trasformazione dell'energia elettrica in energia chimica**, come il Power to Gas (P2G), il Power to Liquid (P2L) o, più in generale, «**P2X**».

L'integrazione di diverse fonti energetiche è, soprattutto al momento, un modo per affrontare queste sfide, in quanto si possono sfruttare le possibile complementarietà delle risorse e quindi migliorare l'affidabilità dell'approvvigionamento.

Infatti diversi sistemi di produzione e stoccaggio dell'energia aiutano a far fronte alle fluttuazioni, seppur aumentino la complessità (e quindi il costo) della produzione.

Energia solare

Energia solare

E' definita come l'energia radiante emessa dal Sole, generata a partire dalle reazioni termonucleari di fusione (in cui gli atomi di idrogeno si aggregano a formare atomi di elio) che avvengono nel nucleo solare, e che producono **radiazioni elettromagnetiche a varie frequenze o lunghezze d'onda**, le quali si propagano poi nello spazio (a velocità caratteristiche delle diverse onde), trasportando con sé energia.

L'energia solare, sottoforma di luce e calore, penetra l'atmosfera terrestre e consente l'attivazione delle reazioni chimiche e biochimiche che determinano la vita sulla Terra.

Dal punto di vista energetico, noi possiamo sfruttare l'energia solare in due diversi modi:

1. Per produrre **energia termica (solare termico)**;
2. Per produrre **energia elettrica (solare fotovoltaico)**.

Energia solare

Le **tecnologie** consolidate per queste trasformazioni sono 3:

1. Il **panello solare termico**, che sfrutta i raggi solari per scaldare un liquido contenuto nel suo interno (e che ha determinate caratteristiche fisico-chimiche), che cede calore, tramite uno scambiatore di calore, all'acqua contenuta in un serbatoio di accumulo.
2. il **pannello solare a concentrazione (solare termodinamico)**, che sfrutta degli specchi parabolici per convogliare i raggi solari su un tubo in cui scorre un fluido termovettore, oppure su degli specchi piani che concentrano i raggi all'estremità di una torre in cui è posta una caldaia riempita di sali che fondono. In entrambi i casi, si i fluidi che assorbono il calore si riscaldano a temperature molto elevate ($400\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 600\text{ }^{\circ}\text{C}$).
3. il **pannello fotovoltaico**, che sfrutta le proprietà di materiali semiconduttori per produrre energia elettrica in risposta alle sollecitazioni della radiazione solare.

Energia solare

PANELLO SOLARE TERMICO



PANNELLO SOLARE A CONCENTRAZIONE



PANELLO FOTOVOLTAICO

Nell'ambito della transizione energetica applicata ai settori industriali e nell'ottica di focalizzarci sui sistemi ibridi, noi tratteremo la progettazione ed integrazione in sistemi energetici dei pannelli fotovoltaici (**PV**) per la produzione di energia elettrica.

Effetto fotovoltaico

Interazione fisica tra radiazione elettromagnetica emessa dal Sole ed un materiale.

La radiazione elettromagnetica investe un materiale e gli cede energia, in particolare agli elettroni più esterni dell'atomo del materiale.

Se l'energia ceduta è sufficiente, l'elettrone diventa libero di allontanarsi dall'atomo, e quindi disponibile come «portatore di carica».

I materiali semi-conduttori (come il silicio), quando investiti da radiazione elettromagnetica, liberano più elettroni, che diventano quindi disponibili come portatori di carica e possono essere sfruttati per generare corrente.

Dispositivi per la conversione dell'energia solare in energia elettrica

I pannelli PV sono ormai una tecnologia ben consolidata per la generazione di corrente continua.

Si trovano in una ampia gamma di materiali (fondamentalmente semi-conduttori) e caratteristiche costruttive, che influenzano l'efficienza ($\eta_{PV} = \frac{P_{out}}{P_{in}}$) con cui il pannello è in grado di trasformare la radiazione incidente in energia elettrica.

Il 95% dei pannelli PV commerciali si basa sullo sfruttamento delle proprietà del silicio.

La maggior parte del silicio in natura si trova sottoforma di silice (ovvero ossido di silicio, SiO_2).

Maggiore è la purezza del silicio, migliore l'efficienza del pannello.

Tuttavia in base alla purezza di silicio che vogliamo ottenere, dovremo considerare diversi processi di lavorazione (che incidono sul costo finale del pannello).

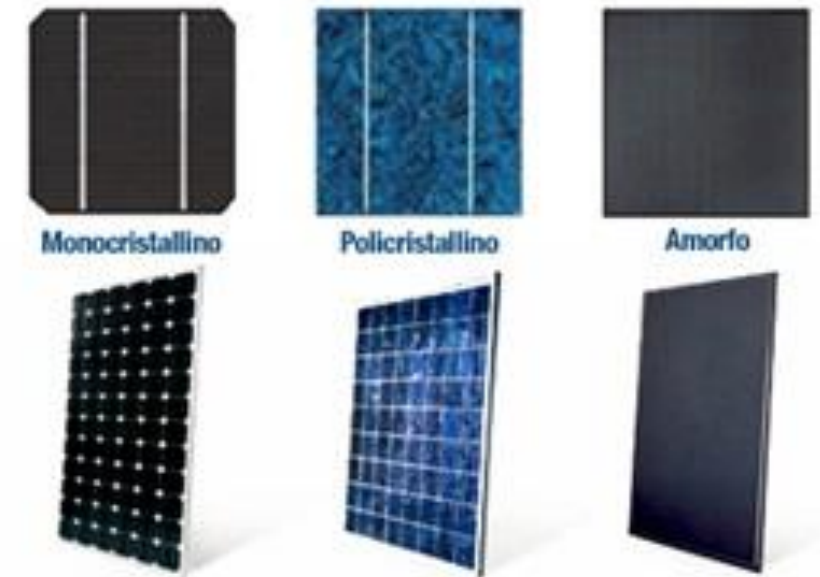
Dispositivi per la conversione dell'energia solare in energia elettrica

Una suddivisione classica delle tipologie di pannelli PV si basa sul tipo di silicio utilizzato:

1. monocristallino: η dell'ordine del 18-21%.
2. policristallino: quello maggiormente diffuso. Meno costoso del precedente, ma meno efficiente (15-17%).
Sono tuttavia costosi in quanto serve SiO_2 puro.
3. film amorfo: molto più economici, ma efficienza molto bassa (8%).

Altre tipologie di celle meno diffuse (circa il 5% del totale) sono:

- Arseniuro di gallio;
 - Rame Indio Gallio Seleniuro;
 - Tellururo di Cadmio;
- etc...



Dispositivi per la conversione dell'energia solare in energia elettrica

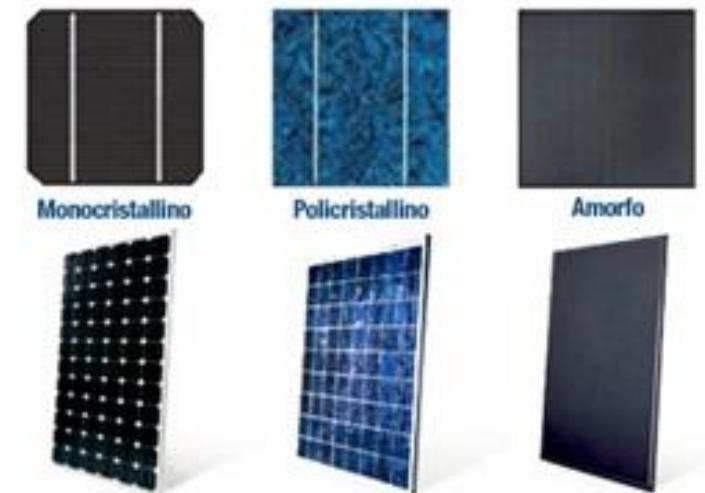
Class of performance	Model name	Type	η [%]	P_p/A [W/m ²]	P_p [W]	Weight [kg]	Cost [EUR]	Ref.
Medium	CanadianSolar CS6K 270P	Poly-crystalline	16.8	164.9	270	18.2	170	[47]
Low	SHARP NA-E130L5	Amorphous – thin film	9.3	92.7	130	24	130	[48]
High	SunPower MAXEON 3	Mono- and poly-crystalline	22.6	226.2	400	19	420	[49]

[47] Canadian Solar, "Datasheet PV module- CS6K-260-265-270-275," 2020. [Online]. Available: <https://deltavolt.pe/documentos/Canadian-Solar-CS6K-P.pdf>

[48] SHARP, "Datasheet SolarNAE_L5_E0514," 2008.

[49] SUNPOWER, "Datasheet MAXEON 3 - 400 W," 2020.

- **Potenza di Picco** P_p (W): Potenza erogata dal modulo alle condizioni standard STC (Irraggiamento = 1000 W/m²; Temperatura = 25 ° C)
- Potenza di Picco per unità di superficie P_p/A (W/m)



Dispositivi per la conversione dell'energia solare in energia elettrica

Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review. Renew Sustain Energy Rev 2016;66:815–24. doi:10.1016/j.rser.2016.08.051.



Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

La caratteristica della luce sole utile alla trasformazione in energia elettrica è detta **IRRADIANZA** (o **densità di potenza o radiazione solare incidente**):

G [W/m²]

ed è il flusso della radiazione elettromagnetica per unità di superficie proveniente dal Sole (W/m²), ed è circa costante.

Integrando l'irradianza nel tempo, si ottiene l' **ENERGIA RADIANTE** (o **irraggiamento**) quando il tempo di riferimento per l'integrazione è di 1 ora:

H [J/m²]

Più in generale si indica con H l'irraggiamento che arriva ad una superficie in un intervallo di tempo specificato. Ad esempio: irraggiamento medio giornaliero: J / m² · giorno o kWh/ m² · giorno ...etc...

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

La caratteristica della luce Solare utile alla trasformazione in energia elettrica è l' **IRRADIANZA** (densità di potenza o radiazione solare incidente):

$$G \text{ [W/m}^2\text{]}$$

che è circa costante.

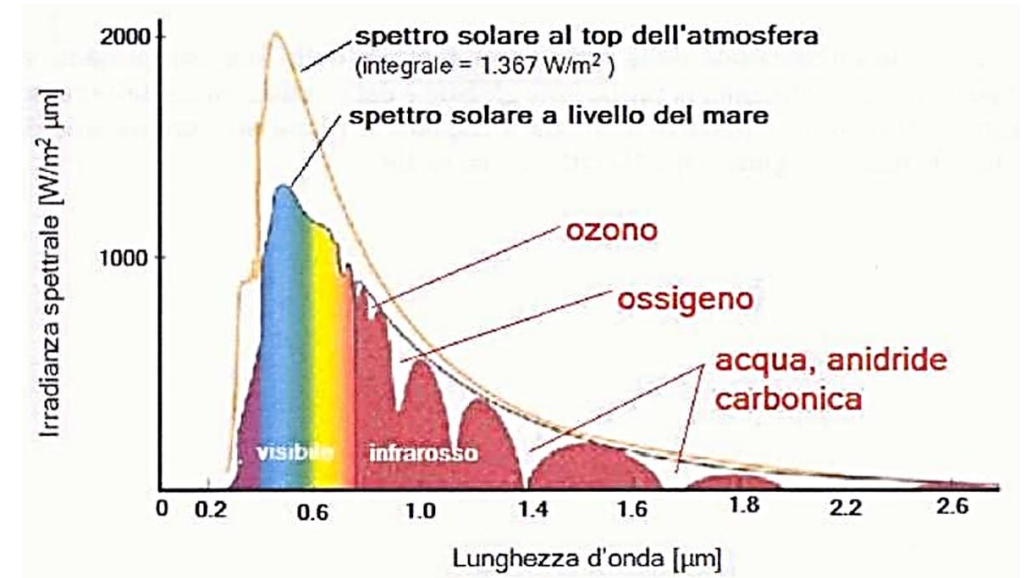
L'irradianza valutata **fuori l'atmosfera terrestre** è pari circa a **1360 W/m²**, con una variabilità del $\pm 3\%$ a seconda:

- della distanza Terra- Sole (che varia per via all'ellitticità dell'orbita terrestre);
- dall'orientazione della Terra rispetto al Sole (asse della terra non è ortogonale all'orbita!)

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

...ma i dispositivi che captano la radiazione solare sono sulla superficie terrestre, dove arriva un'irradianza minore di 1360 W/m^2 a causa della presenza **dell'atmosfera** che causa fenomeni di:

1. Assorbimento di radiazione solare
2. Diffusione (riemissione) di radiazione solare

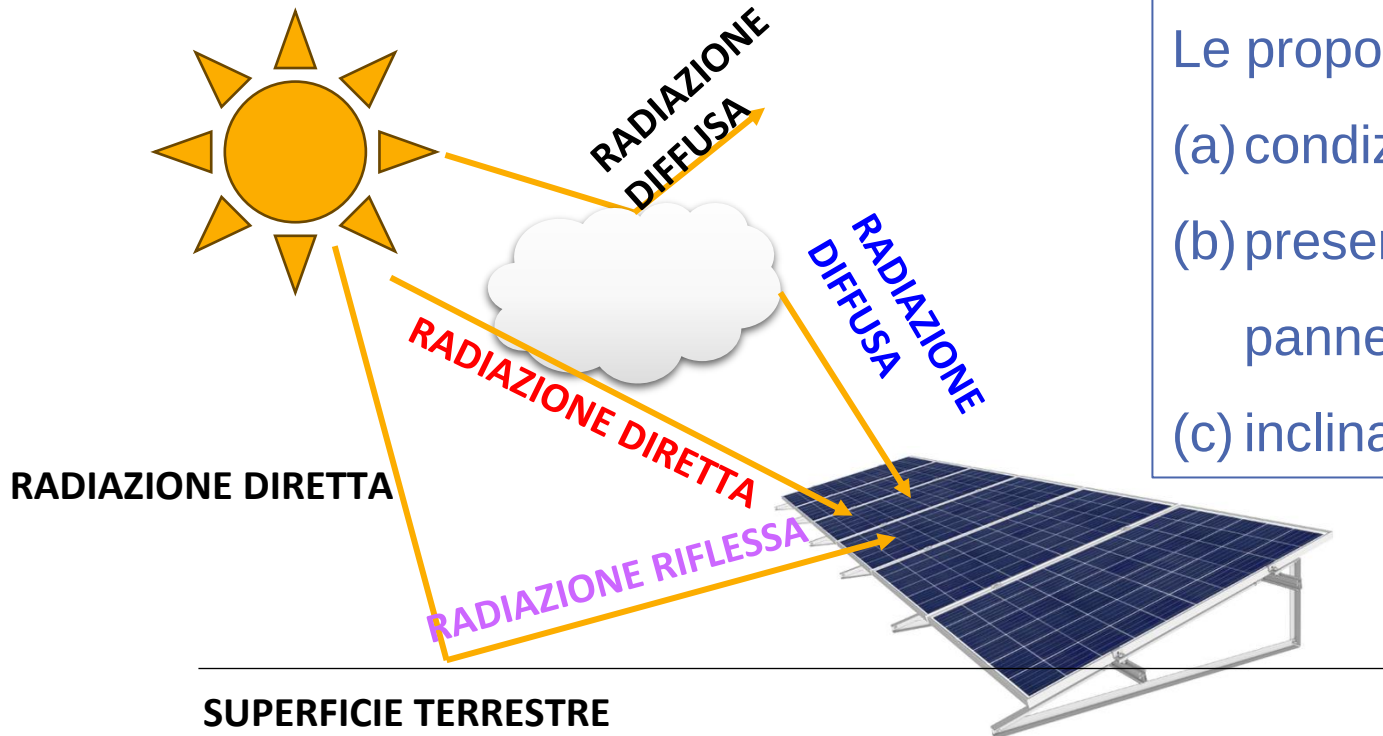


Sulla superficie terrestre, a livello del mare, in condizioni meteorologiche ottimali e a mezzogiorno, lo stesso valore è pari a circa **1000 W/m^2** .

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

La quota di **radiazione solare incidente** che arriva ad una superficie captante (**pannello**) è dunque data da 3 contributi:

1. **Diretto** (ovvero al netto di quanto viene assorbito dall'atmosfera)
2. **Diffuso** (ovvero riemesso dall'atmosfera)
3. **Riflesso** (dalle superfici circostanti il pannello)



Le proporzioni tra i tre contributi sono determinate da:

- (a) condizioni meteorologiche (presenza nuvole)
- (b) presenza di superfici riflettenti/assorbenti attorno al pannello
- (c) inclinazione della superficie captante

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Quando la **superficie captante** è perfettamente **orizzontale** dobbiamo valutare **2 contributi** per la radiazione incidente:

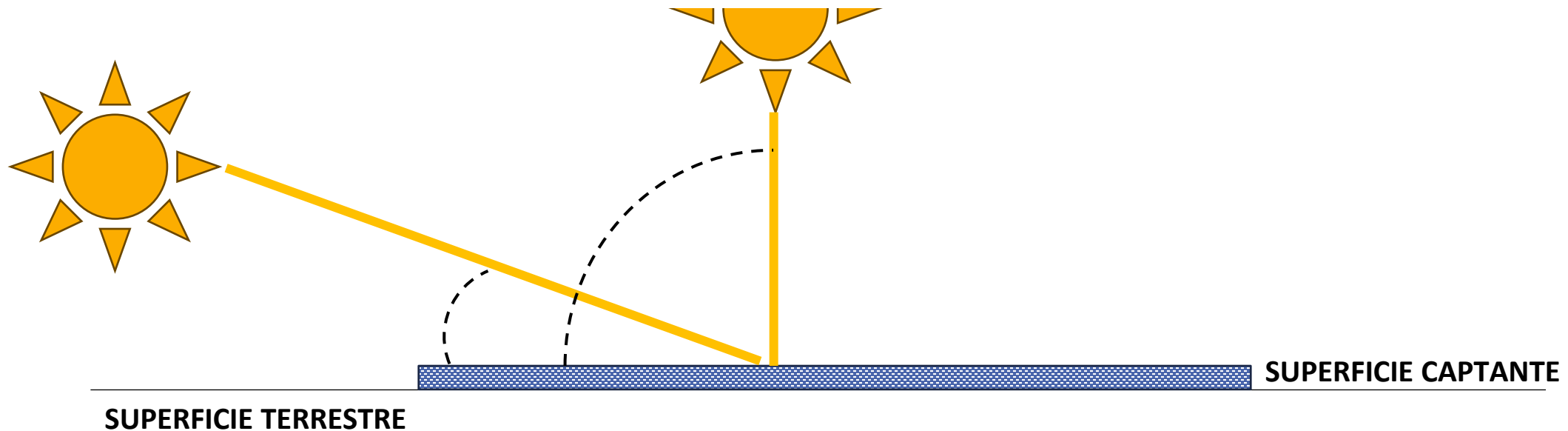
- 1. Diretto** (ovvero al netto di quanto viene assorbito dall'atmosfera)
- 2. Diffuso** (ovvero riemesso dall'atmosfera)

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Quando la **superficie captante** è perfettamente orizzontale dobbiamo valutare **2 contributi** per la radiazione incidente:

- 1. Diretto:** l'intensità della radiazione solare incidente su una superficie posta al suolo è influenzata dall'angolo di inclinazione della radiazione stessa rispetto alla superficie:

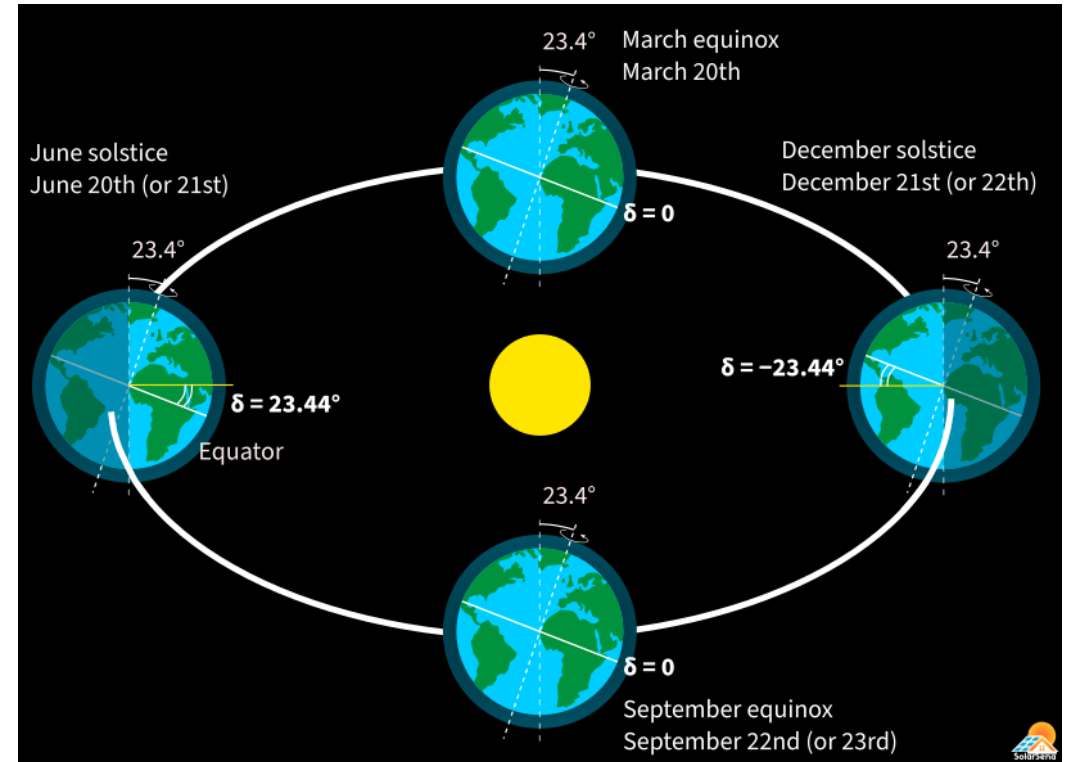
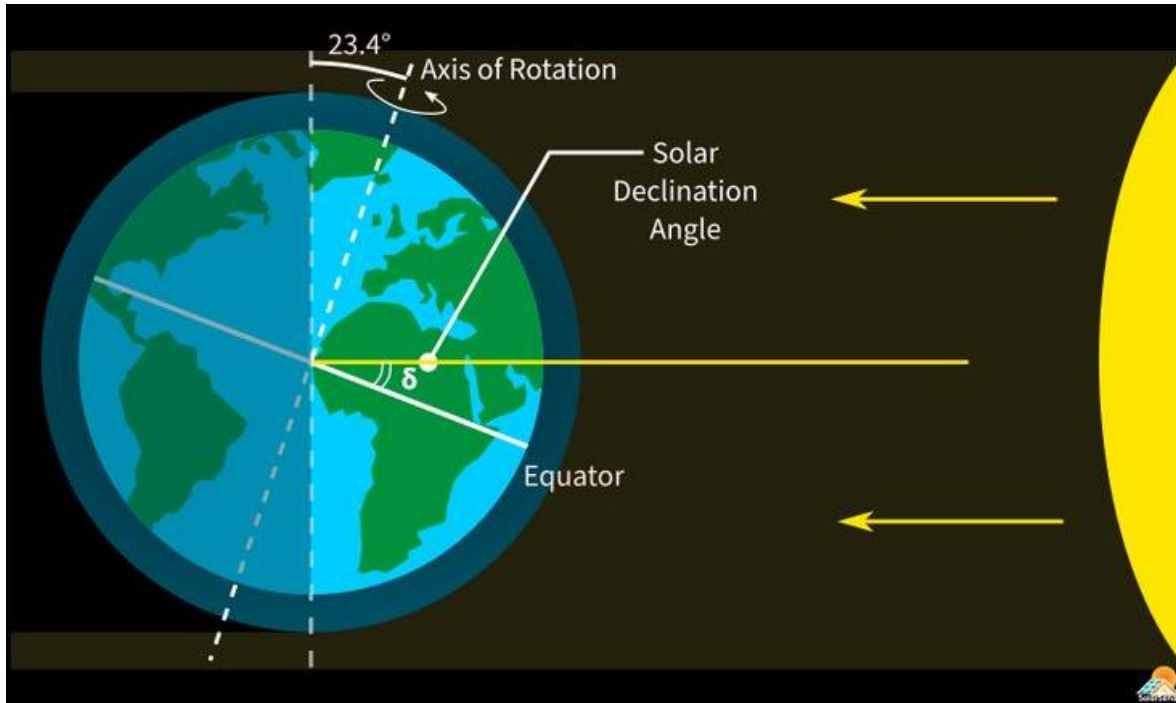
minore è l'angolo che i raggi del sole formano con una superficie orizzontale,
maggiore è lo spessore di atmosfera che essi devono attraversare.



Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Ci sono quindi **2 paramenti** fondamentali che la determinano l'intensità della **radiazione diretta**:

- I. **latitudine**: della località di installazione della superficie captante, proprio per via dell'angolo che si forma tra radiazione incidente e superficie captante.
- II. **declinazione del Sole**: è l'angolo che i raggi del Sole formano con il piano equatoriale terrestre, che varia durante l'anno:



Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Quando la **superficie captante è perfettamente orizzontale** dobbiamo valutare **2 contributi** per la radiazione incidente:

- 2. Diffuso:** siccome viene perturbata dall'atmosfera, si attenua in intensità e cambia direzione (e/o lunghezza d'onda). Questa **dipende dalle condizioni atmosferiche**.

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Quando la **superficie captante** è **inclinata** dobbiamo valutare anche:

3. Radiazione riflessa: dalle superfici circostanti.

La capacità di riflessione si quantifica con un parametro detto coefficiente di **albedo** (**valori compresi tra 0 e 1, o in %**), che è il rapporto tra la radiazione riflessa da una superficie e la radiazione incidente sulla superficie stessa:



**Maggiore l'albedo,
maggiore la
capacità riflettente**

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

La superficie terrestre ha valore medio di albedo del 40%.

Norma UNI 8477

Neve (caduta di fresco o con un film di ghiaccio): 0,75-0,90

Superfici acquose: 0,07

Suolo (creta, marne): 0,14

Strade sterrate: 0,04

Bosco di conifere d'inverno: 0,04

Bosco in autunno: 0,26

Asfalto invecchiato: 0,10

Asfalto fresco: 0,04

Calcestruzzo invecchiato: 0,22

Foglie morte: 0,30

Erba secca: 0,20

Erba verde: 0,26

Tetti e terrazze in bitume: 0,13

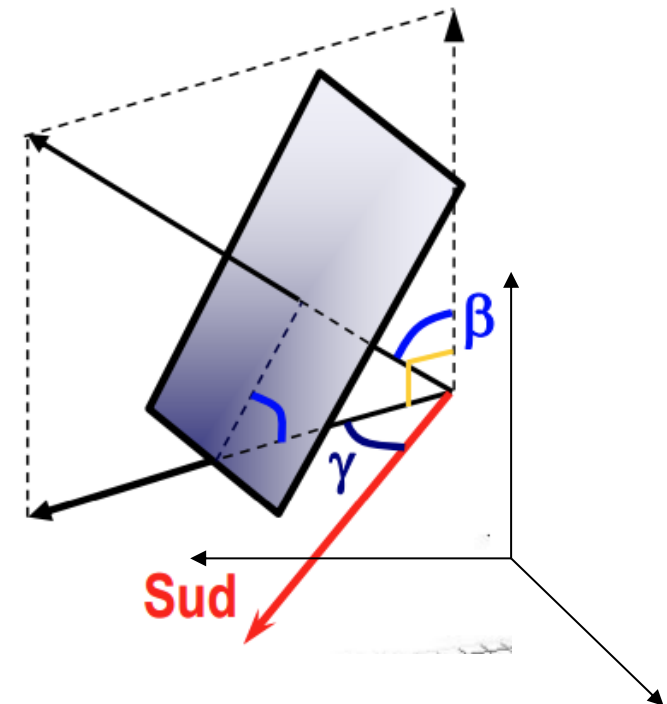
Pietrisco: 0,20

Caratteristiche e potenziale dell'energia solare

Inoltre, quando la **superficie captante** è **inclinata** dobbiamo valutare anche come influiscono **2 parametri di installazione del pannello**:

1. l' **ANGOLI DI INCLINAZIONE β** (in rad): che vale zero per una superficie orizzontale e 90° per una ortogonale al suolo.
2. l' **ANGOLO DI ORIENTAZIONE γ** (in rad): vale zero se il pannello è orientato a sud nell'emisfero settentrionale o a nord nell'emisfero australe.

che influiscono su radiazione diretta, diffusa e riflessa.



L'energia solare: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

L'irradianza e l'irraggiamento sono indice della potenziale quantità di energia elettrica che si potrebbe produrre in un certo luogo, e servono a quantificare l'energia elettrica potenzialmente producibile.

L'energia elettrica realmente prodotta dipende anche dalle caratteristiche del dispositivo utilizzato per la conversione (che ha una sua efficienza) e da altri fattori (e.g. temperatura dell'ambiente attorno al pannello PV).

Quindi il calcolo dell'energia prodotta da un impianto PV consterà di due fasi:

- 1. La valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione**
- 2. La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione**

L'energia solare: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

1. La valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

Siccome H varia nel tempo, noi analizzeremo dei vettori nel tempo che riportano:

(irraggiamento totale, irraggiamento diretto, albedo)

che si trovano tabulate per diverse latitudini e riferiti ad una superficie orizzontale. Questi vanno poi rielaborati per riferirli alla nostra superficie captante.

Il metodo di calcolo è descritto nella Norme tecniche:

- UNI 10349 Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una **superficie orizzontale**
- **UNI 8477 Metodo di calcolo sperimentale dell'irraggiamento su una superficie comunque inclinata ed orientata**

L'energia solare: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

Strumento che implementa questo calcolo (implementazione UNI 8477/1):

<http://www.solaritaly.enea.it/CalcRggmmIncl/Calcola3.php>

Altri strumenti disponibili per calcoli simili:

<http://www.solaritaly.enea.it/CalcComune/Calcola.php>



Ottimizzazione dell'angolo di inclinazione (β) e di orientazione (γ) del pannello PV

Il posizionamento e l'orientamento del pannello PV sono parametri chiave per massimizzare la H che il pannello è in grado di ricevere in un dato intervallo temporale.

Quando dimensioniamo **pannelli fissi**, l'approccio tipico è quello di guardare i valori mensili di H per almeno 1 anno, e impostare (**REGOLA EMPIRICA**):

1. l'angolo di inclinazione pari alla latitudine diminuita di 10° : $\beta = \varphi - 10^\circ$
2. l'angolo di orientazione più possibile orientato a sud nell'emisfero boreale o a nord in quello australe.

Tipicamente, i grandi campi solari sono situati in aree piatte per favorire l'assenza di ombreggiamento. Inoltre spesso si avvalgono delle così dette “**solar-tracking technology**”, per cui i pannelli ruotano per variare la propria inclinazione durante l'anno (pannelli a singolo asse) o addirittura la propria orientazione durante il giorno (pannelli a doppio asse). Chiaramente, queste tecnologie sono più costose, soprattutto in termini di manutenzione.

La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

2. La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

Sulla base delle specifiche tecniche del pannello:

Class of performance	Model name	Type	η [%]	P_p/A [W/m ²]	P_p [W]	Weight [kg]	Cost [EUR]	Ref.
Medium	CanadianSolar CS6K 270P	Poly-crystalline	16.8	164.9	270	18.2	170	[47]
Low	SHARP NA-E130L5	Amorphous – thin film	9.3	92.7	130	24	130	[48]
High	SunPower MAXEON 3	Mono- and poly-crystalline	22.6	226.2	400	19	420	[49]

[47] Canadian Solar, "Datasheet PV module- CS6K-260-265-270-275," 2020. [Online]. Available: <https://deltavolt.pe/documentos/Canadian-Solar-CS6K-P.pdf>

[48] SHARP, "Datasheet SolarNAE_L5_E0514," 2008.

[49] SUNPOWER, "Datasheet MAXEON 3 - 400 W," 2020.

Energia eolica

Energia eolica

E' definita come l'**energia cinetica di una massa d'aria** in movimento, ovvero l'energia del vento.

Dal punto di vista energetico, noi possiamo sfruttare l'energia eolica in due diversi modi:

1. Per produrre **energia meccanica**, attraverso **mulini a vento** o **pompe eliche** (se vogliamo trasportare un fluido)



2. Per produrre **energia elettrica**, attraverso le **turbine eoliche** (o aerogeneratori o generatori eolici).

Energia eolica

L'energia eolica ha il vantaggio di essere una fonte molto abbondante in natura e largamente disponibile, oltre che mediamente stabile annualmente in una data zona; tuttavia una **variazione significativa si ha tra giorno e notte**.

Per questo di solito viene utilizzata per contribuire fino al 20% di una domanda energetica in sistemi ibridi.

Hannele Holttinen, et al., "Design and Operation of Power Systems with Large Amounts of Wind Power", IEA Wind Summary Paper (PDF), su [ieawind.org](http://www.ieawind.org), Global Wind Power Conference 18–21 September 2006, Adelaide, Australia:

https://webcitation.org/61DCFd3dj?url=http://www.ieawind.org/AnnexXXV/Meetings/Oklahoma/IEA%20SysOp%20GWPC2006%20paper_final.pdf

Per contro **richiede ampi spazi**: i più grandi campi eolici sono costituiti da centinaia di turbine collegate alla rete.

Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

Possiamo definire diverse classi di impianti eolici in base alle loro capacità di produzione di energia elettrica:

1. **Microeolico:** generatori con portatili (e solitamente per applicazioni ad uso domestic o di piccola attività, e.g. ospedali da campo, barca a vela,...), con capacità di generazione ≤ 1 kW.

Questi generatori riescono ad alimentare piccoli elettrodomestici (ma non i grandi elettrodomestici!).

I dispositivi possono essere ad asse verticale od orizzontale.

2. **Minieolico:** generatore di altezza inferiore a 20 metri, con capacità di generazione ≤ 200 kW. Sono tipicamente impiegati per la produzione di energia elettrica isolata (auto-produzione) o per la **generazione distribuita** (collegamento alla rete). Sono prevalenti quelli ad asse orizzontale, con diametro del rotore da 3 a 20 metri e altezza del mozzo da 10 a 20 metri. Esistono anche quelli ad asse **verticale**.

3. **Eolico:** generatori ad asse orizzontale, con pale lunghe tra i 20 ed i 60 metri, atte a produrre fino a 6 MW di potenza. Le altezze variano tra i 60 ed i 100 metri.

Nell'ambito della transizione energetica applicata ai settori industriali e nell'ottica di focalizzarci sui sistemi ibridi, noi tratteremo la progettazione ed integrazione in sistemi energetici dei generatori eolici ad asse orizzontale per la produzione di energia elettrica.



Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

Distinguiamo la tipologia di dispositivi sulla base di come catturano il vento:

1. Ad **asse orizzontale**: il rotore è orientato parallelamente alla direzione del vento.

Sono formati da una torre in acciaio (di altezza tra i 60 ed i 100 m) sopra alla quale si trova la “navicella” (o “gondola”) che contiene il generatore elettrico, che è azionato dalla rotazione di pale (lunghe dai 20 ai 60 metri).

Questo tipo di dispositivo, nelle sue diverse dimensioni, è adatto a produrre energia elettrica nel range dei **kW-MW**.

I rotori possono essere:

- Monopala
- Bipala
- Tripala

Le turbine onshore più grandi hanno diametro del rotore di 70-100 metri e altezze di 110 metri.

In una macchina così costruita il diametro della fondazione in calcestruzzo armato è pari a circa 20 metri!

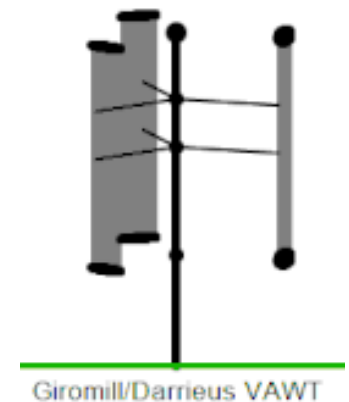
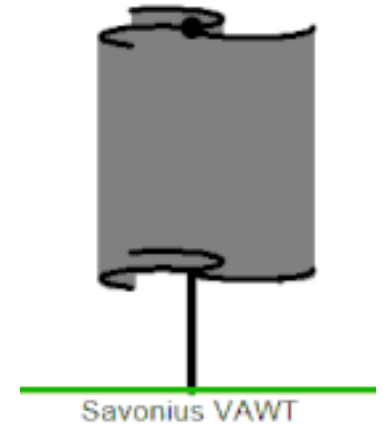


Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

2. Ad **asse verticale**: il rotore è ortogonale al suolo.

Queste sono più resistenti alle raffiche di vento e sfruttano meglio tutte le direzioni del vento.

Possono essere usate per produrre energia elettrica **fino ad 1 MW**.



Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

Maggiore è l'energia cinetica che un generatore riesce ad estrarre dal vento, maggiore è la diminuzione di velocità del vento a valle della turbina.

- **C_p**:
Rapporto tra la potenza meccanica ceduta alla turbina e la potenza del vento prima di impattare sulla pala.
Il valore massimo teorico (fluido incompressibile, rotore ideale, assenza di attrito) è di 0,593 (limite di Betz).

Le turbine reali riescono ad arrivare circa all' 80% del limite di Betz.

I generatori ad asse orizzontale hanno generalmente un'efficienza maggiore, che arriva fino a $CP = 0,47$.
Quelli ad asse verticale si attesta intorno a $CP = 0,35 - 0,40$ (circa 60 % del limite di Betz).

Per questo motivo le turbine orizzontali risultano più adatte alla produzione su grande scala, mentre quelle verticali sono più indicate per una produzione domestica, anche perché sono più piccole (a parità di potenza erogata), più silenziose e con maggior facilità di manutenzione.

Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

- **TSR:**

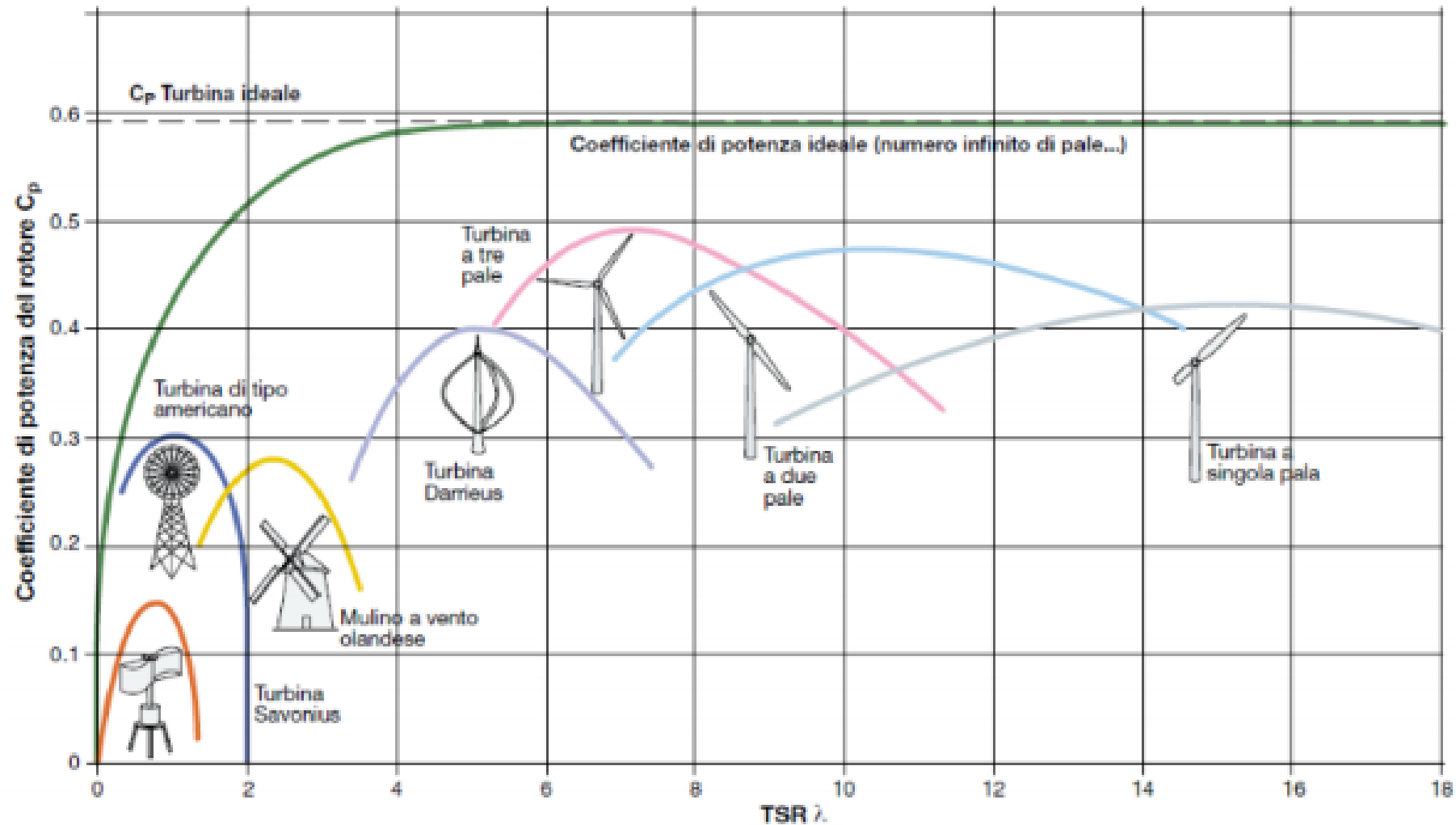
(Tip Speed Ratio) λ : Rapporto tra la velocità tangenziale della punta delle pale e la velocità del vento, calcolata come $\lambda = \frac{\omega R}{v}$, con ω velocità angolare del rotore, R lunghezza delle pale e v velocità del vento.

TSR è una forma di quantificare l'efficienza della pala, e dipende dal design della pala stessa.

Valori alti del TSR sono sinonimo di alte forze centrifughe che agiscono sulla pala, e quindi di conseguenza:

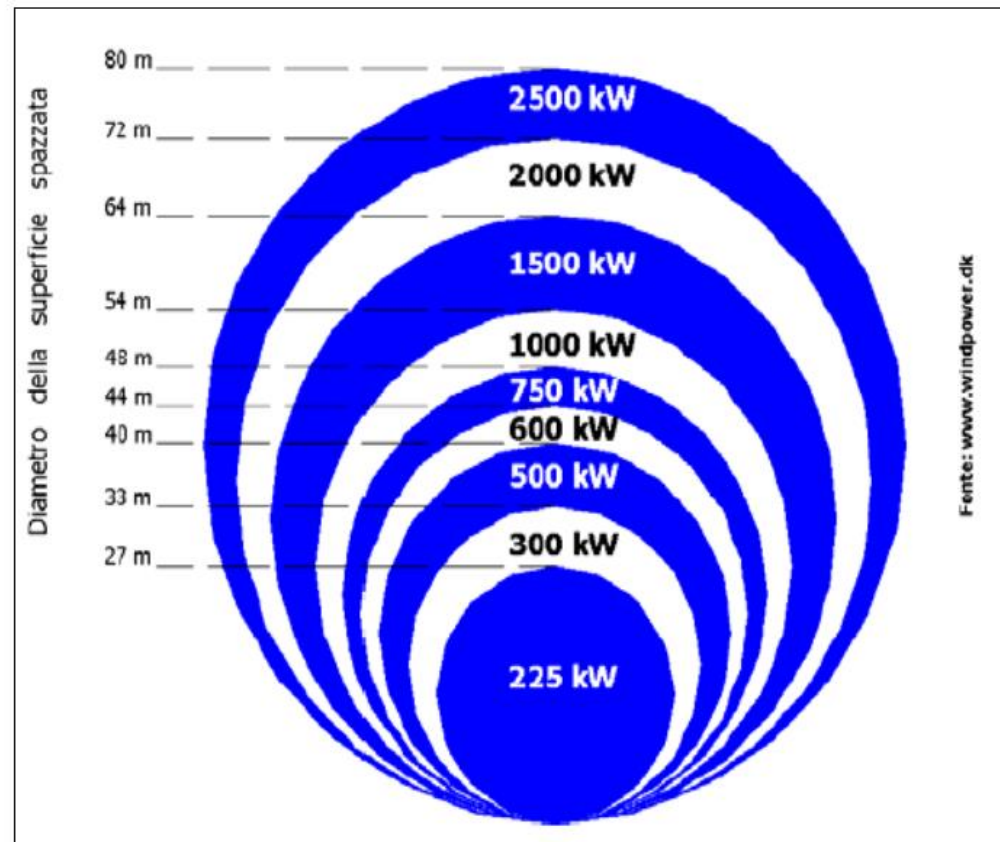
- Il dispositivo sarà più rumoroso;
- Il dispositivo dovrà avere delle pale più forti per sostenere gli sforzi.

Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica



Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

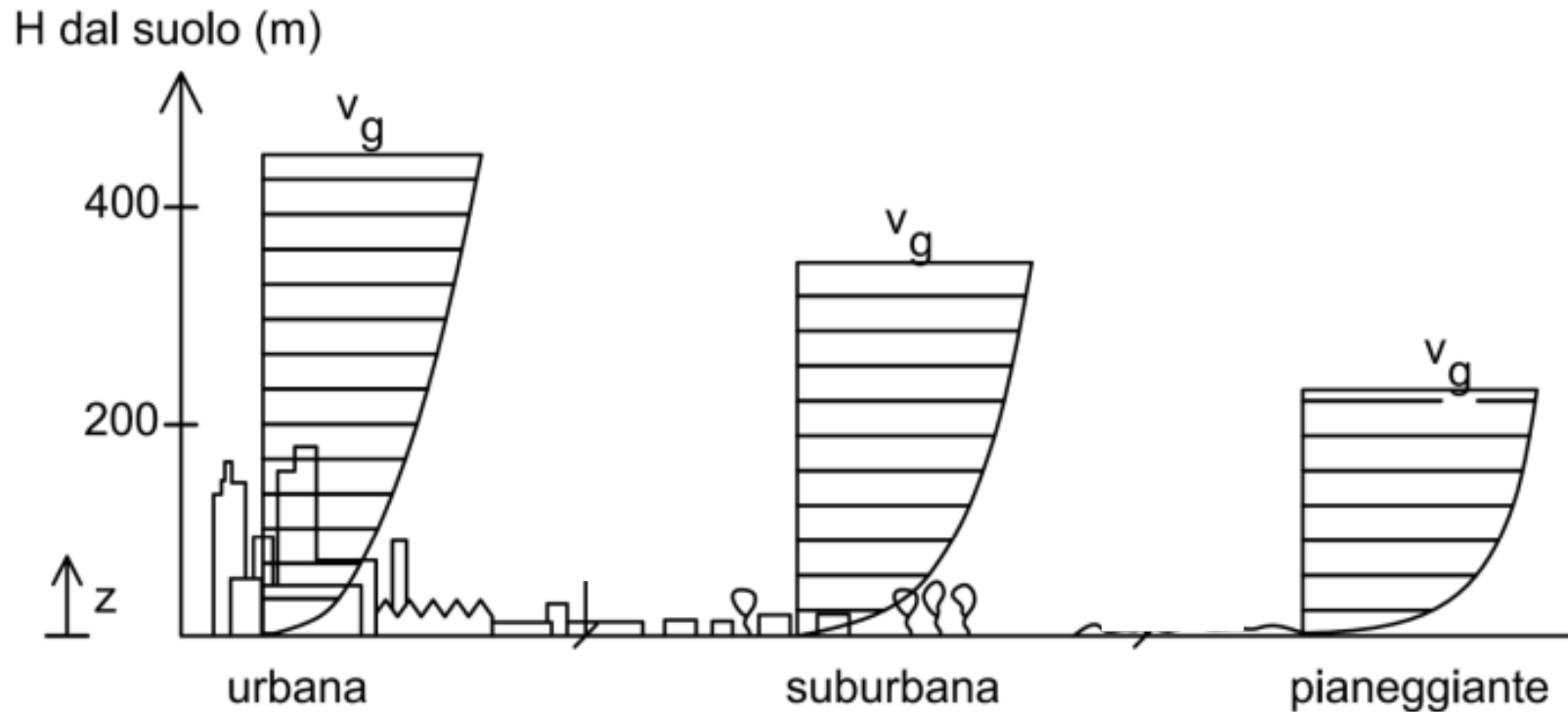
Perché le facciamo le pale così grandi?



Dispositivi per la conversione dell'energia eolica in energia elettrica

Perché le facciamo così alte?

https://moodle2.unipi.it/pluginfile.php/193135/mod_resource/content/1/03c%20STRUTTURE%202017-18%20rev12.pdf



Potenza erogata da dispositivo eolico

$$P_W = P_{wind,av} \cdot A_g \cdot \eta_m \cdot \eta_e \cdot c_P$$

(W)

Dove

- $P_{wind,av}$ Densità di Potenza del vento nel sito $P_{wind,av}$ (W/m²)
- A_g area “spazzata” dalle pale del generatore (m²)
- η_m efficienza meccanica del generatore data dal costruttore (-)
- η_e efficienza elettrica del generatore data dal costruttore (-)
- c_P coefficiente di potenza (-) dato dal costruttore, e che dipende dalle velocità a monte e a valle della pala

$$P_{wind,t} = \frac{1}{2} \rho_a v_t^3$$

(W/m²)

Dove

- ρ_a è la densità dell'aria (va bene considerarla costante e pari a 1.225 kg/m³)
- v_t Velocità media del vento al tempo t (m/s)

Caratteristiche e potenziale dell'energia eolica

Il vento è un vettore. Le caratteristiche utili alla trasformazione in energia elettrica sono:

1. La sua **velocità** (m/s)
2. La sua **direzione** (°)

Questi dati sono reperibili a determinate altezze, sono caratterizzati, in un certo periodo di osservazione, da delle distribuzioni matematiche ben precise.

Quindi analizzeremo dei dati in forma di vettori nel tempo

(velocità del vento, direzione)

che sono indice della **potenziale** quantità di energia elettrica producibile in un certo luogo.

Come abbiamo visto per il solare, l'energia **reale** prodotta dipenderà anche dalle caratteristiche del dispositivo utilizzato per la conversione e da fattori ambientali (efficienza, temperatura ambiente, ...).

Quindi, come in precedenza, avremo due fasi nel calcolo:

1. **La valutazione dell'energia potenziale**
2. **La valutazione dell'energia reale in base al dispositivo scelto per la trasformazione**

L'energia eolica: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

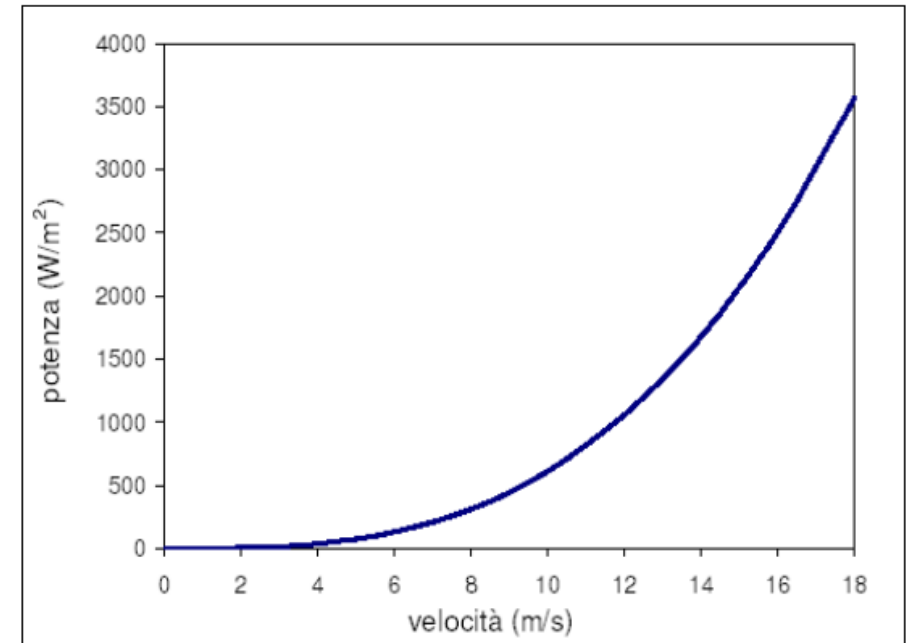
1. La valutazione dell'energia potenziale

Approccio molto semplificato in funzione del tempo t:

$$P_{wind,t} = \frac{1}{2} \rho_a v_t^3 \quad (\text{W/m}^2)$$

Dove

- ρ_a è la densità dell'aria (va bene considerarla costante e pari a 1.225 kg/m^3)
- v_t Velocità media del vento al tempo t (m/s)



http://159.213.57.103/lamma-webgis/pdf/Generalita_sull'energia_eolica.pdf

L'energia eolica: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

1. La valutazione dell'energia potenziale

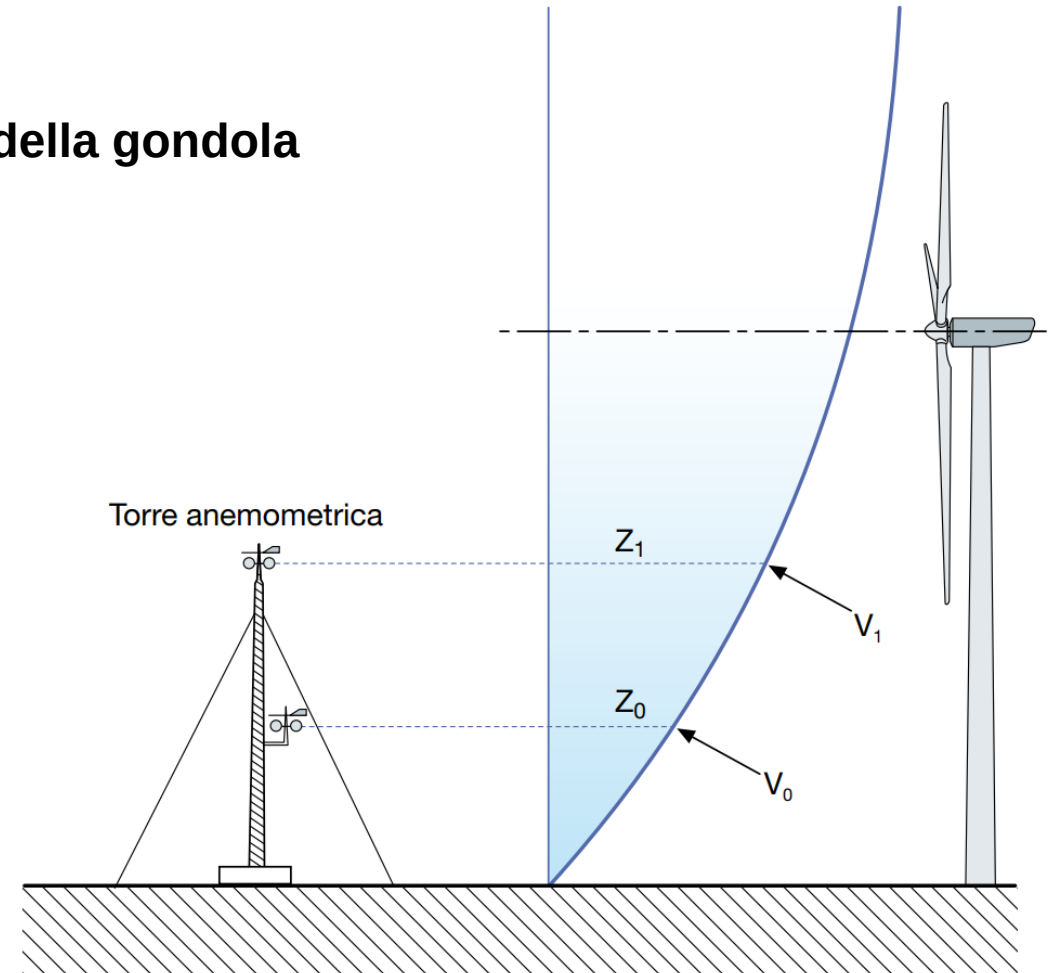
quindi dobbiamo valutare **la velocità del vento all'altezza della gondola**

$$v(h) = v(h_0) \left(\log \left(\frac{h}{z_0} \right) \right) / \left(\log \left(\frac{h_0}{z_0} \right) \right)$$

h (m): Altezza della gondola

$v(h_0)$ (m/s): velocità all'altezza h_0 del terreno

z_0 (m): scabrezza del terreno (TABULATA)



La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

2. La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

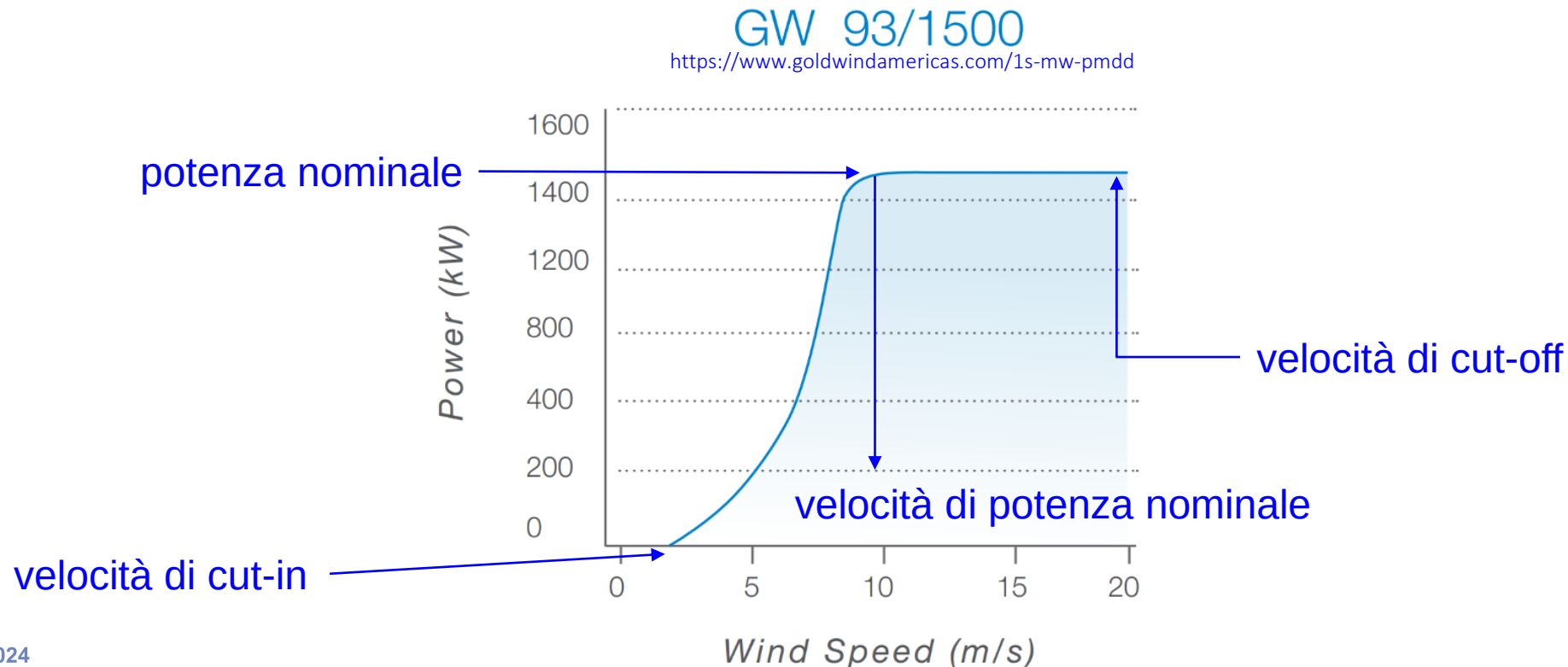
I parametri importanti che guidano la scelta del generatore più adatto ad un certo sito sono:

- **Potenza nominale (kW):** massima potenza che il generatore può produrre
- **Velocità nominale (m/s):** velocità del vento per avere la potenza nominale (m/s)
- **Velocità di cut-in (m/s):** al di sotto della quale la potenza prodotta è nulla. Tipicamente 3-5 m/s.
- **Velocità di cut-off (m/s):** al di sopra della quale il generatore si ferma per motivi di sicurezza. Tipicamente 20-25 m/s.

La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

2. La valutazione dell'energia elettrica prodotta in base al dispositivo scelto per la trasformazione

Il **costruttore** ci fornisce la **curva di potenza** del generatore eolico, che riporta la **potenza elettrica** in erogata in funzione della **velocità del vento**:



Energia marina

Energia marina

Con il termine energia marina (o pelagica) in realtà si intenderebbero diverse forme di energia possedute da mari ed oceani, quali:

- l'energia delle correnti marine
- del gradiente salino (osmosi)
- delle maree
- del moto ondoso
- mareotermica (o talassotermica)

ciascuna delle quali ha diverso potenziale stimato:

- 300 TWh/anno dalle maree
- 800 TWh/anno dalle correnti marine
- 2.000 TWh/anno dal gradiente salino
- 10.000 TWh/anno dal gradiente termico
- **8.000 – 80.000 TWh/anno dalle onde**

Energia marina

AD OGGI SI STIMA UN POTENZIALE TEORICO TOTALE DI 114000 TWh/y
che potrebbe coprire il 400% (!!!) della domanda globale di energia elettrica

F. Boshell, R. Roesch, A. Salgado, and J. Hecke, "Unlocking the potential of Ocean Energy: from megawatts to gigawatts," energypost.eu, 2021.
[Online]. Available: <https://energypost.eu/unlockingthe-potential-of-ocean-energy-from-megawatts-to-gigawatts/#:~:text=The theoretical resource potential of resource utilised to generate energy>.

Tuttavia, lo sfruttamento di questa risorsa è ancora molto indietro, anche rispetto ai target che i paesi si erano prefissati per il 2023 ed il 2025 (che erano di 4 e 15 TWh rispettivamente): al momento l'energia elettrica prodotta da energia marina è pari a 957 GWh (ed una capacità installata di 524 MW).

IRENA, "Renewable energy employment by country," 2021. <https://www.irena.org/Statistics/View-Data-by-Topic/Benefits/Renewable-Energy-Employment-by-Country> (accessed Feb. 26, 2021).
IRENA, RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2022. 2022. [Online]. Available: www.irena.org

Energia marina

Nell'ambito del seminario, viste le stime sul potenziale energetico delle diverse forme di energia marina, noi ci concentreremo sull' **energia da moto ondoso**, ovvero l'energia cinetica posseduta dalle onde.

Un'altra caratteristica fondamentale dell'energia da onde nel contesto delle RES, è che, rispetto a solare ed eolico, è quella più **prevedibile** e **stabile** nel tempo.

E. Rusu, "Evaluation of the wave energy conversion efficiency in various coastal environments", *Energies*, vol. 7, no. 6, pp. 4002–4018, 2014, doi: 10.3390/en7064002.

Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

I dispositivi per la conversione dell'energia da onda in energia elettrica sono detti **wave energy converter**, **WEC**, ovvero dispositivi cimoelettrici.

I WECs si possono classificare a seconda del **principio fisico** sul quale sono basati:

1. **a colonna d'acqua oscillante** (*oscillating water columns*)
2. **a corpo oscillante** (*oscillating bodies*)
3. **a salto idrico** (*overtopping*) o a tracimazione

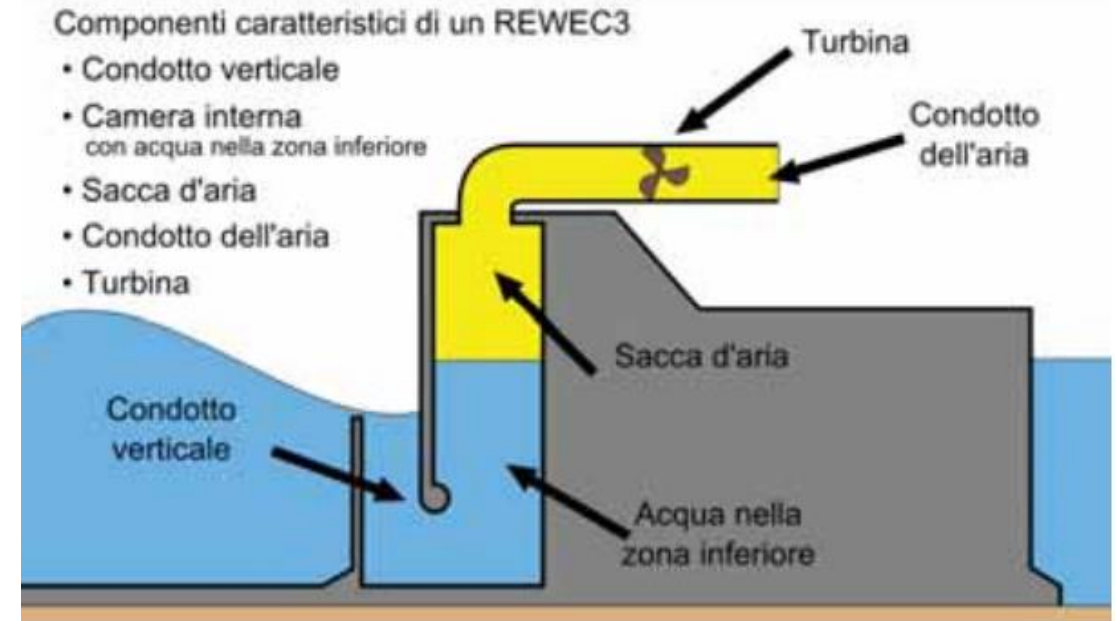
Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

1. WEC a colonna d'acqua oscillante

(*oscillating water columns, OWC*):

Si sfrutta la variazione di livello dell'acqua all'interno di una camera (es. colonna); tale variazione provoca la compressione ed espansione dell'aria al di sopra dell'acqua, mettendo in moto una **turbina** (turbina **ad aria**).

Tipicamente vengono usate le turbine **Wells**, che hanno il vantaggio di ruotare sempre nello stesso senso (**autorettificanti**), a prescindere dal verso del fluido che le attraversa; in questo moto non si spreca energia nell'inversione di senso di marcia.

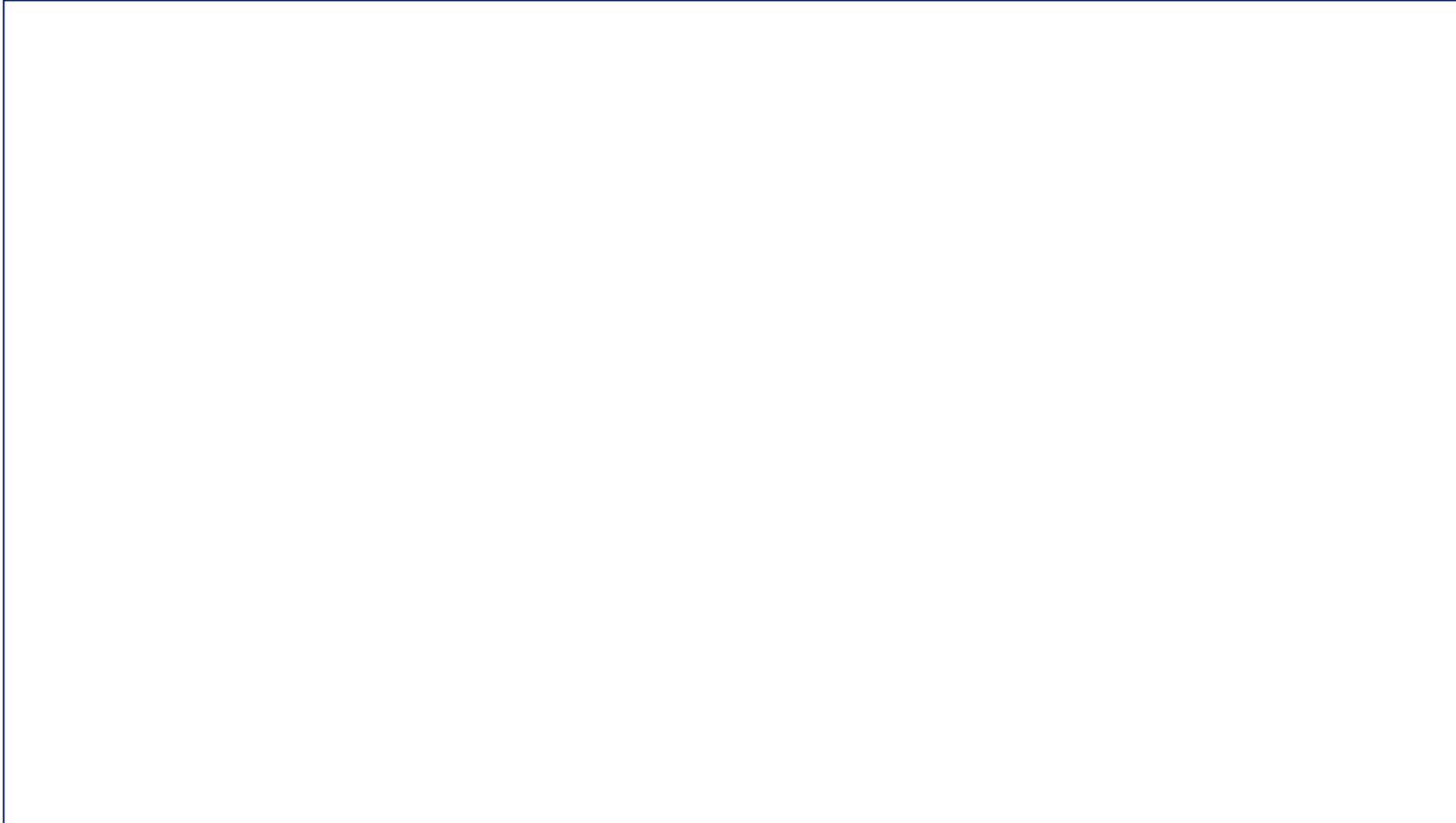


Colonne d'acqua oscillanti come risorsa energetica costiera di Esmeralda Tuccimei

Sono dispositivi **rumorosi** e presentano diversi problemi di **compatibilità** con gli organismi acquatici, che potrebbero rimanere intrappolati nella camera d'aria.

Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

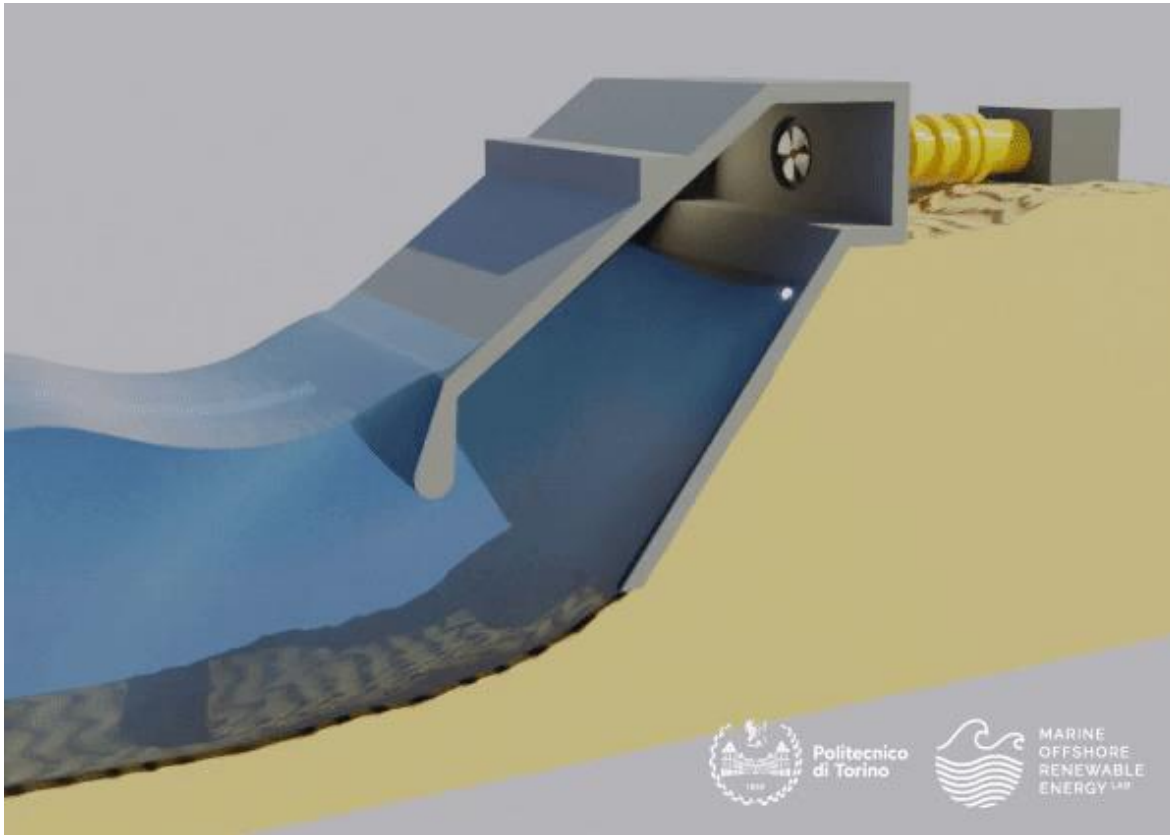
1. **WEC a colonna d'acqua oscillante** (*oscillating water columns, OWC*): <https://www.youtube.com/watch?v=kXfSrCWA7qA>



Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

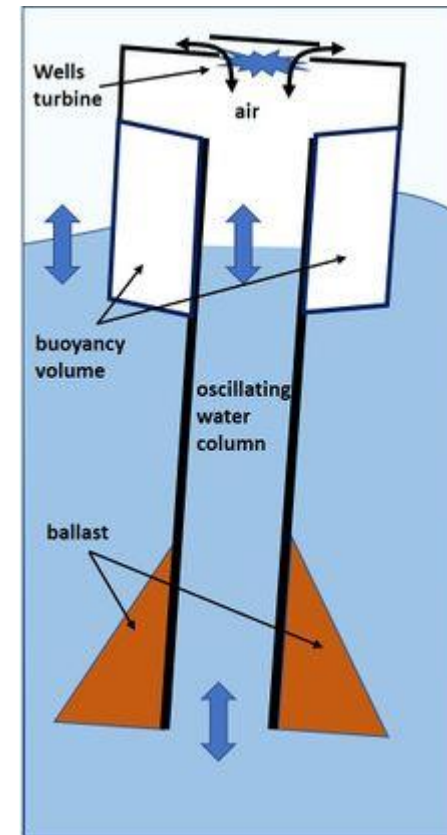
1. WEC a colonna d'acqua oscillante (*oscillating water columns, OWC*):

STRUTTURA FISSA



<http://www.moreenergylab.polito.it/wec/>

STRUTTURA GALLEGGIANTE



https://www.coastalwiki.org/wiki/Wave_energy_converters



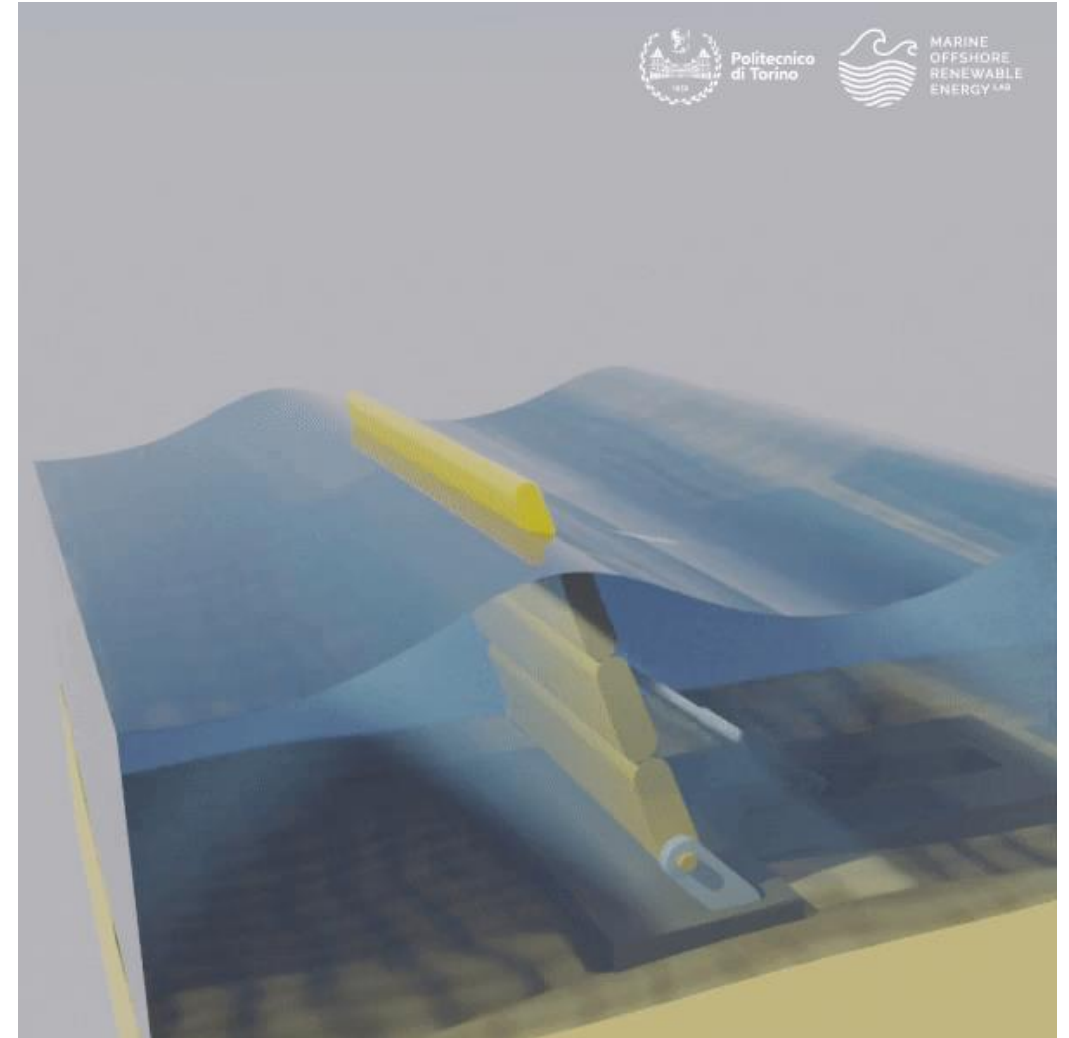
Spar Buoy

Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

2. a corpo oscillante (oscillating bodies):

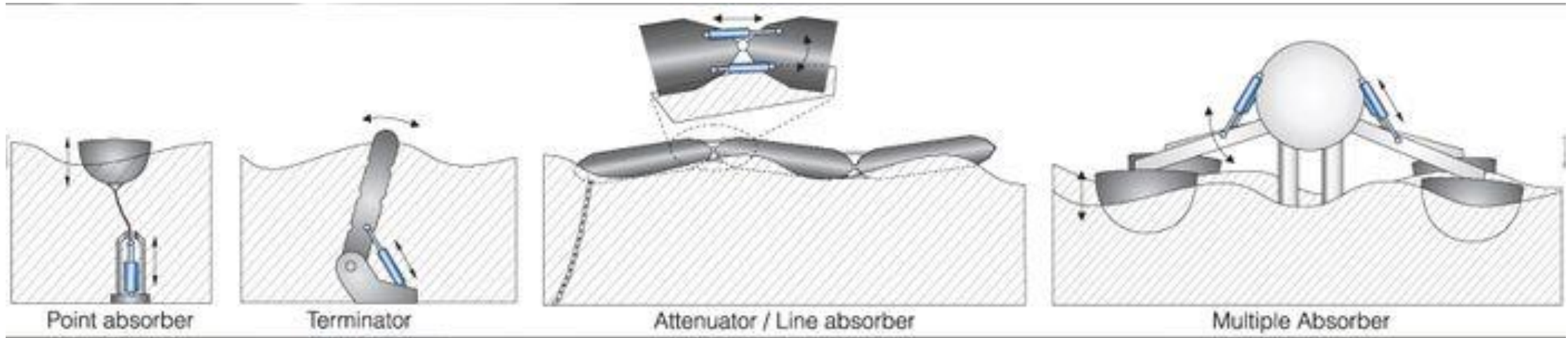
Si sfrutta il moto oscillatorio di un corpo, che può essere una paratia, un galleggiante (boa), una membrana, ...

I dispositivi possono essere a **struttura galleggiante o sommersa**.



Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

2. a corpo oscillante (oscillating bodies): Si possono poi suddividere ulteriormente, **a seconda della loro orientazione rispetto al moto ondoso**:



Hansen, R.H., Kramer, M.M. and Vidal, E. 2013. Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter. Energies 6: 4001-4044; doi:10.3390/en6084001

Point absorbers

Catturano l'energia d'onda da tutte le direzioni

Terminators

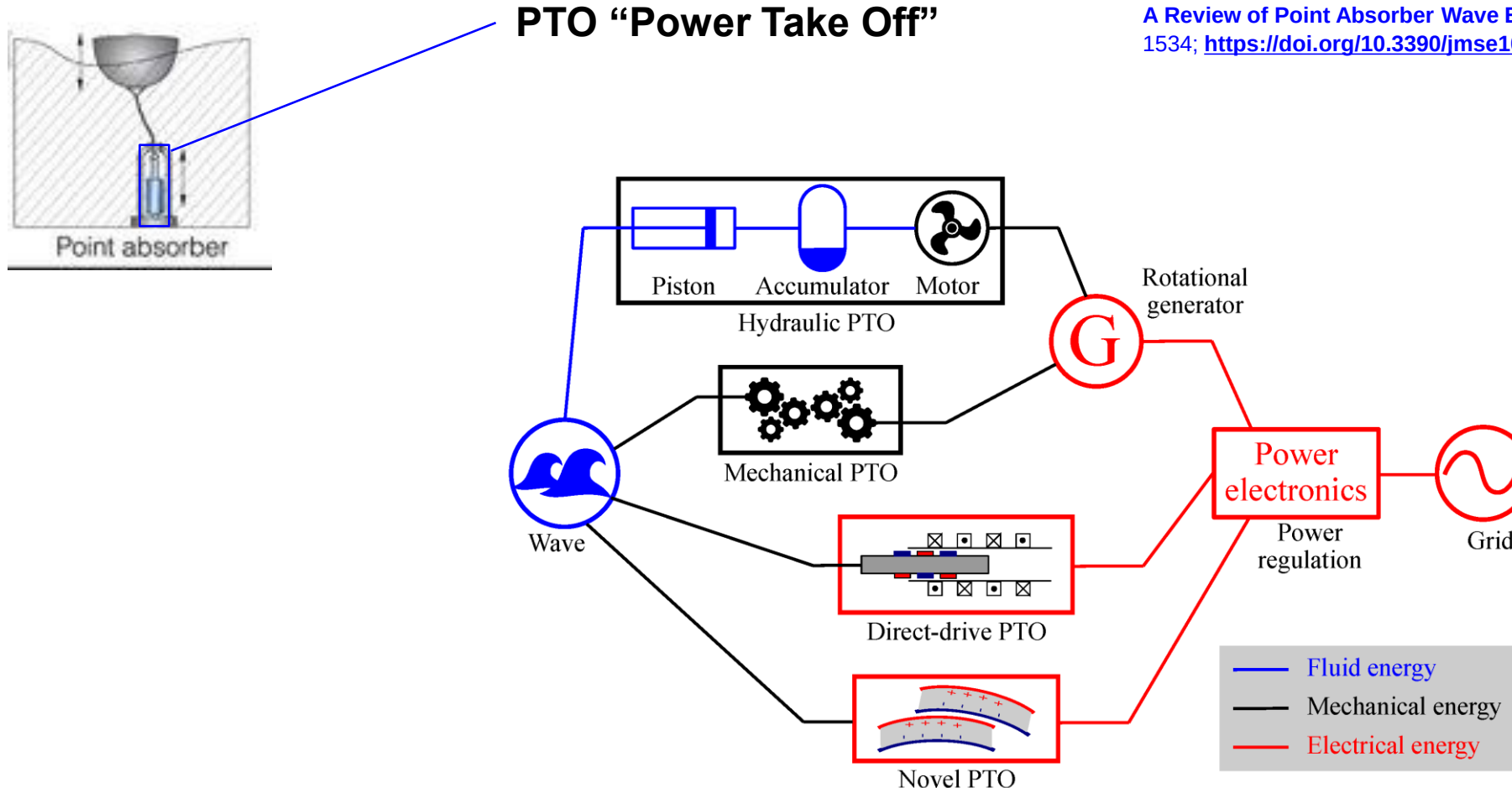
Sono posti perpendicolarmente rispetto alla direzione d'onda predominante

Attenuators

Sono posti in parallelo alla direzione d'onda predominante e quindi cavalcano l'onda

Multiple adsorbers

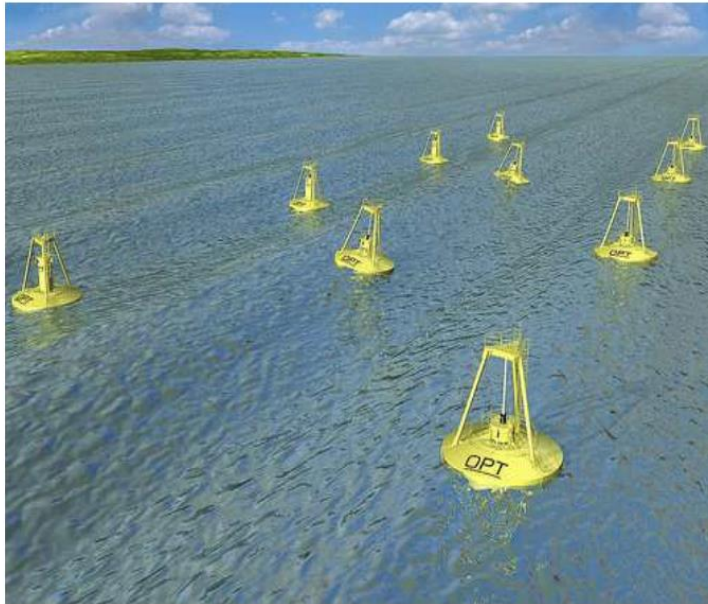
Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica



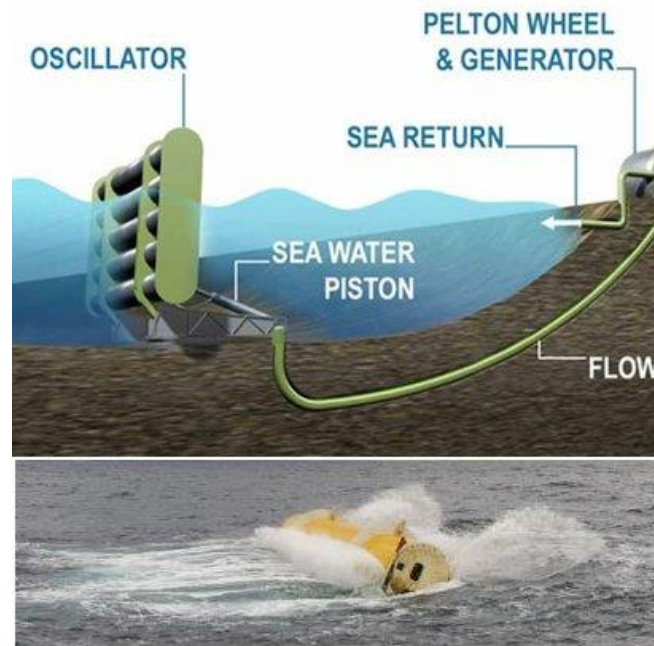
A Review of Point Absorber Wave Energy Converters, J. Mar. Sci. Eng. 2022, 10(10), 1534; <https://doi.org/10.3390/jmse10101534>

Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

2. a corpo oscillante (oscillating bodies):



PowerBouy
Point absorber



Wave Roller
Terminator



Pelamis
Attenuator

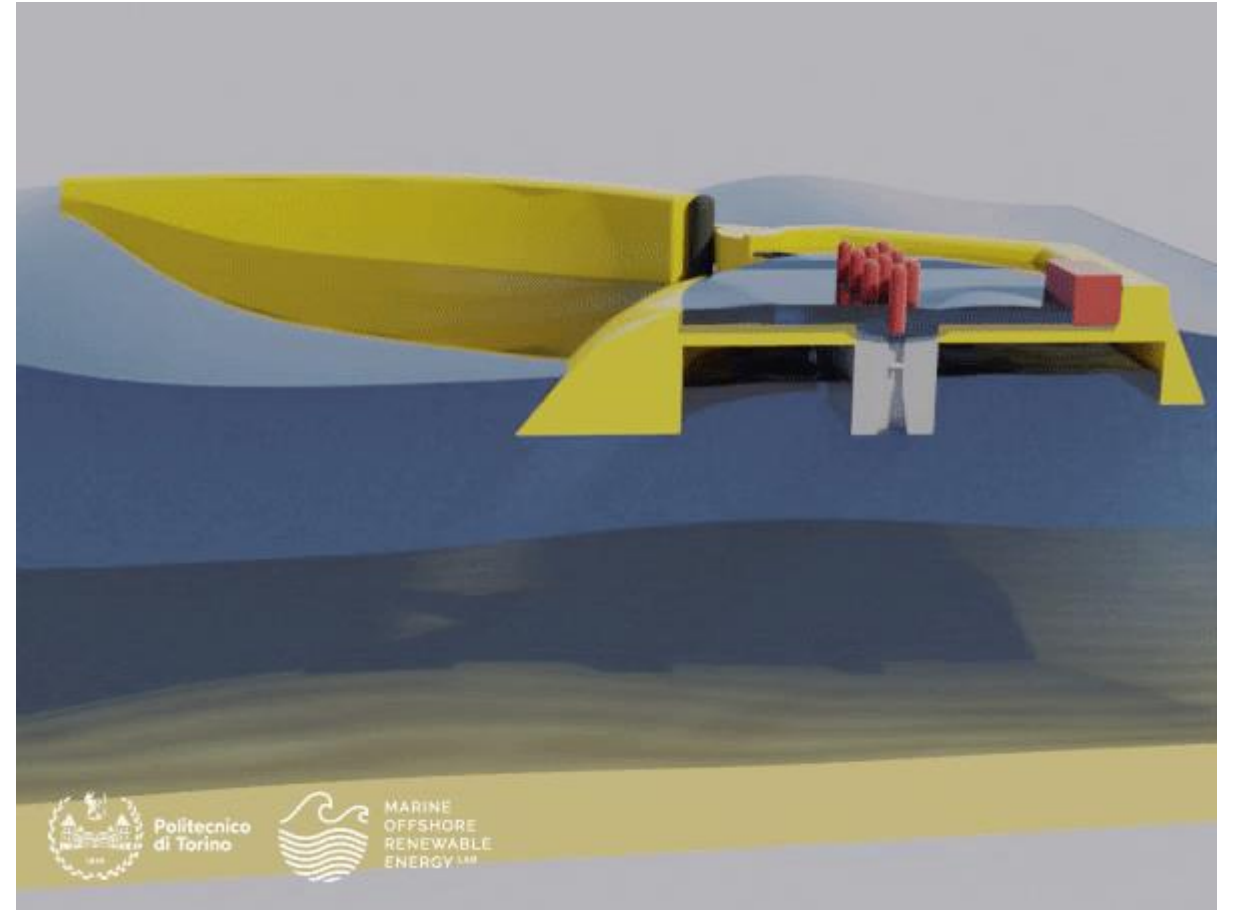
Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

3. a salto idrico (overtopping) o a tracimazione:

Questi dispositivi sfruttano lo stesso principio delle dighe per la generazione di energia idroelettrica, ovvero l'acqua viene convogliata, attraverso una rampa, in un bacino, che si trova ad una quota più elevata rispetto al livello del mare.

L'energia potenziale data dalla differenza di quota è sfruttata in una **turbina idraulica**, che ricarica l'acqua in mare.

I prototipi odierni hanno potenza di 4-7 MW, ed un ingombro orizzontale nell'ordine dei 200-300 metri, comprensivi del bacino, dello “scivolo” e delle paratie laterali per il convogliamento dell'acqua in arrivo.

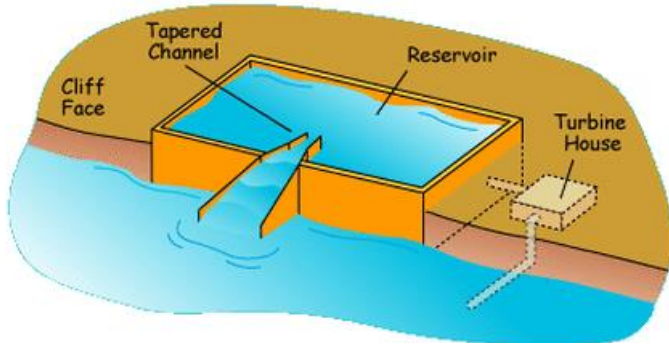


<http://www.moreenergylab.polito.it/wec/>

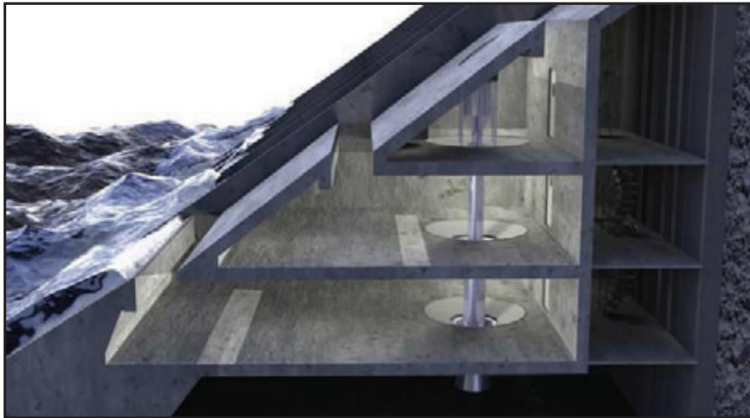
Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica

1. 3. a salto idrico (overtopping) o a tracimazione:

STRUTTURA FISSA



TAPCHAN



SSG

<https://www.flow3d.com/wp-content/uploads/2014/04/Structural-Response-of-Seawave-Slot-cone-Generator-SSG-from-Random-Wave-CFD-Simulations.pdf>

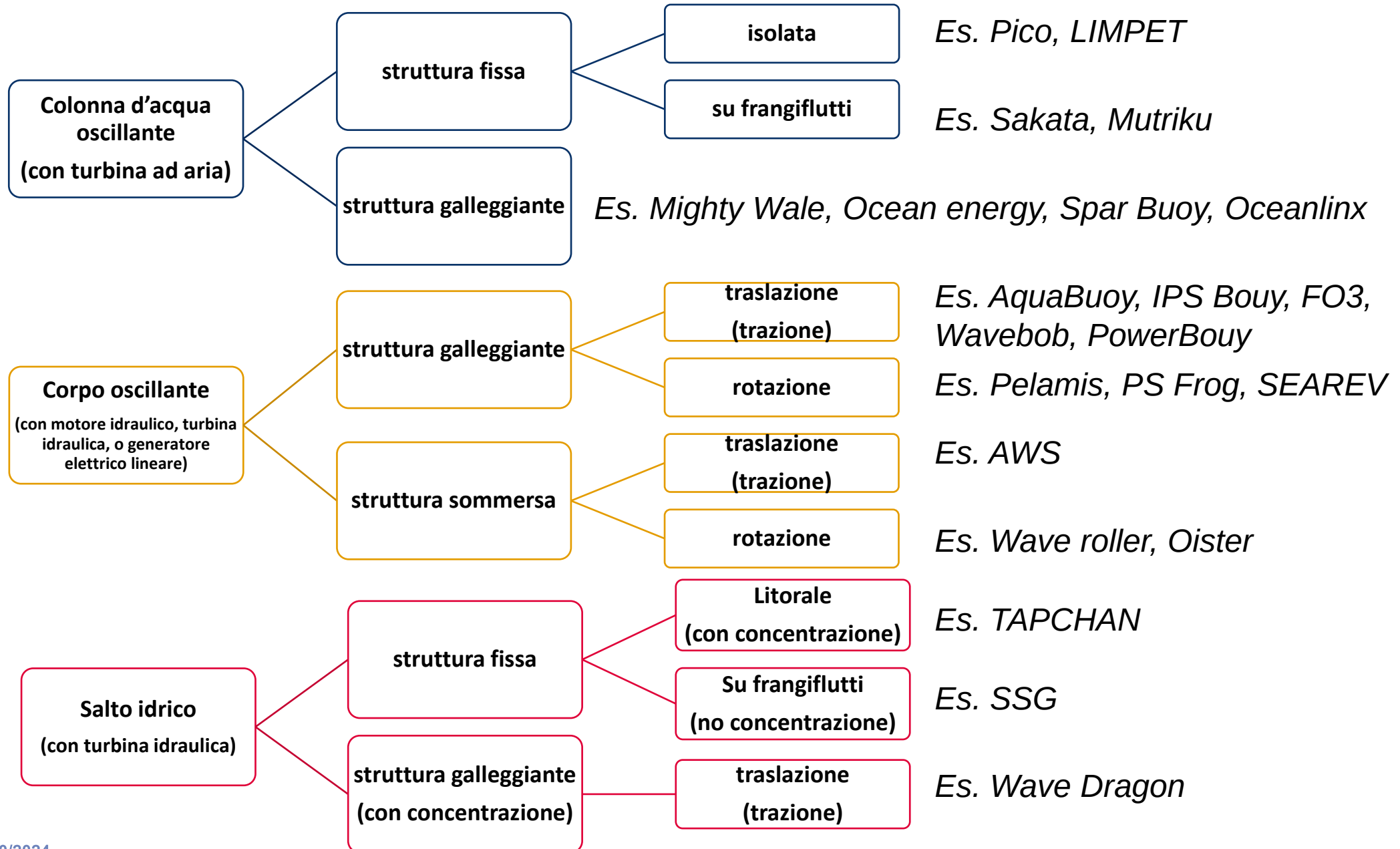
STRUTTURA GALLEGGIANTE



Wave Dragon

https://www.coastalwiki.org/wiki/Wave_energy_converters

Dispositivi per la conversione dell'energia da onde in energia elettrica



Caratteristiche e potenziale dell'energia marina

Le onde marine sono create dall'effetto del vento sulla superficie dell'acqua.

Più veloce è il vento, più soffia a lungo, e più vasta è l'area su cui soffia, più alte saranno le onde generate.

In generale, le onde sono caratterizzate da due parametri fondamentali:

- L'**ampiezza** (o **altezza**) (m)
- Il **periodo** (o **frequenza**) (1/s o Hz)

Le onde del mare, ovviamente non sono tutte uguali, per cui il campionamento di ampiezze e periodi, in una certa zona ed in un dato intervallo temporale, restituirà una distribuzione nei dati (come succedeva nel caso dell'energia eolica).

L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

Come già visto per solare ed eolico, avremo due fasi nel calcolo:

1. La valutazione dell'energia potenziale

Per la valutazione dell'energia potenziale di sito, dobbiamo capire **«quanta energia portano» onde caratterizzate da diverse altezze e periodi**, quindi analizzeremo dei dati in forma di vettori nel tempo

(altezza d'onda, periodo, direzione)

L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

1. La valutazione dell'energia potenziale

Una volta in possesso dei dati meteo, possiamo determinare **l'energia potenziale d'onda**, che altro non è che la densità di **potenza dell'onda per unità di lunghezza della cresta dell'onda all'ora t-esima** ($P_{wave,t}$, W/m):

$$P_{wave,t} = \frac{\rho_{water} \cdot g^2}{64\pi} \cdot T_{e,t} \cdot H_{s,t}^2 \quad (\text{W/m})$$

G. Reikard, "Integrating wave energy into the power grid: Simulation and forecasting," Ocean Eng., vol. 73, pp. 168–178, 2013, doi: 10.1016/j.oceaneng.2013.08.005.

Dove

- ρ_{water} è la densità dell'acqua mare (va bene considerarla costante e pari a 1025 kg/m³)
- g è l'accelerazione di gravità (9.8 m/s²)
- T è il periodo d'onda in funzione del tempo (1/s)
- H è l'altezza d'onda in funzione del tempo (m)

Si passa poi alla valutazione di $P_{wave,av}$ come valore medio di $P_{wave,t}$ in un determinato periodo.

L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

2. La valutazione dell'energia reale in base al dispositivo scelto per la trasformazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

La scelta è dettata da:

- a) le specifiche del sito di installazione, cioè e **shoreline**, **nearshore** oppure **offshore**;
- b) le caratteristiche delle onde del sito.

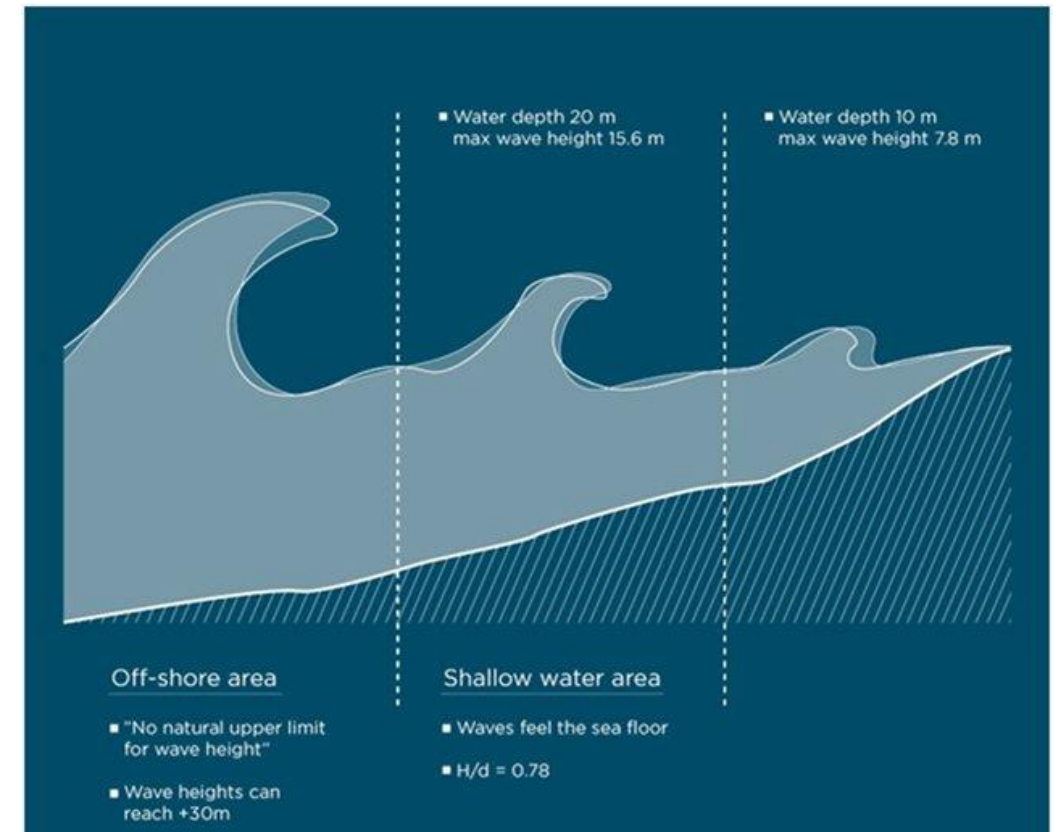
L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

https://www.researchgate.net/publication/283368443_Estimation_of_Wave_Energy_from_Wind_Velocity/figures?lo=1

a) Se il sito di installazione è **shoreline**, **nearshore** oppure **offshore**:

- **Offshore** (profondità > 30 m)
 - **maggior densità** energetica delle onde;
 - minor impatto visivo;
 - difficoltà di accesso al sito;
 - trasmissione dell'energia (tramite lunghi cavi elettrici sottomarini)
 - necessità di ancoraggi dei dispositivi.

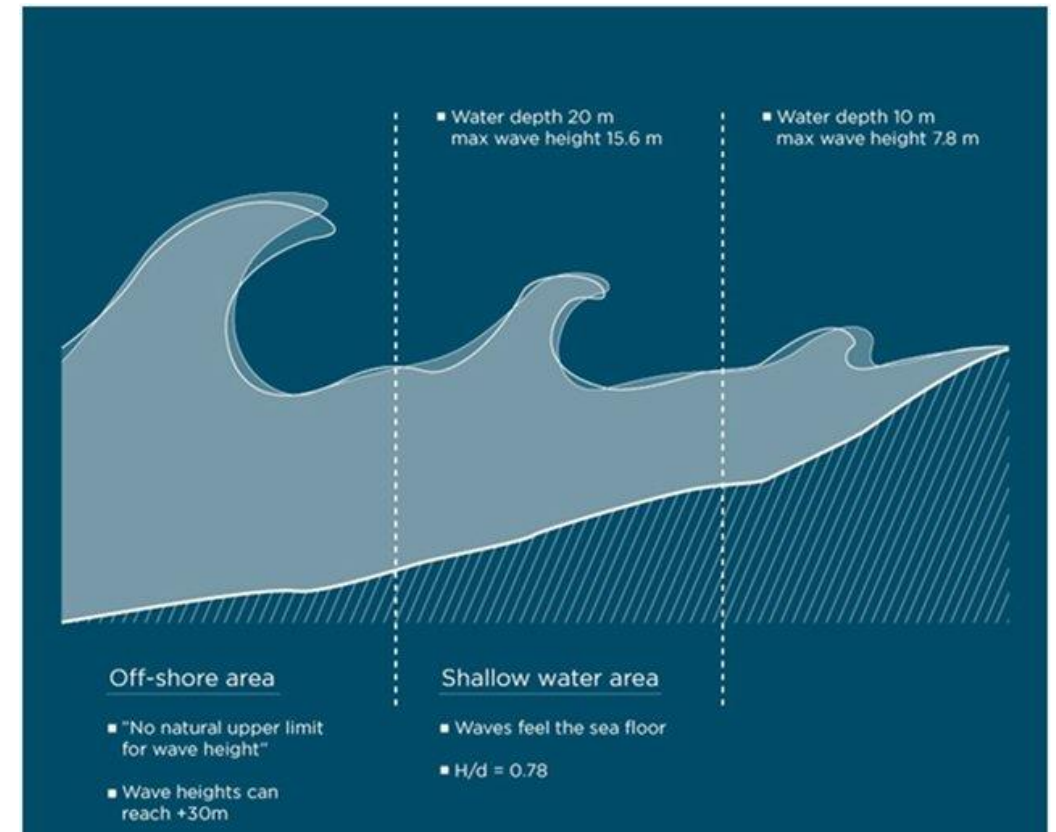


L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

https://www.researchgate.net/publication/283368443_Estimation_of_Wave_Energy_from_Wind_Velocity/figures?lo=1

- a) Se il sito di installazione è **shoreline**, **nearshore** oppure **offshore**:
- **Nearshore** (30 m > profondità > 10 m)
 - Minor densità energetica delle onde;
 - Siccome il moto ondoso risente del fondale, sarà più costante come intensità che direzione, quindi possono progettare convertitori che lavorano in condizioni ottimali per la maggior parte del tempo;
 - Accesso, ancoraggio e trasmissione facilitate.
 - **Shoreline** (profondità < 10 m)
 - Tutti i vantaggi data dalla vicinanza alla costa;
 - Impatto sulla costa stessa, dato che sono tipicamente ingombranti.



L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

SCELTA DEL DISPOSITIVO

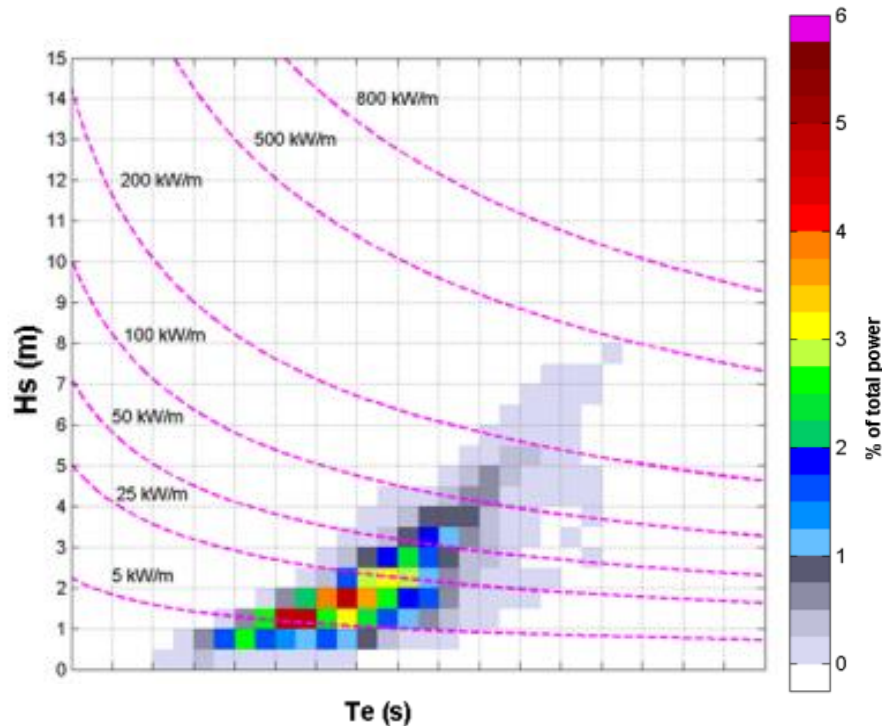
b) le caratteristiche delle onde del sito:

Dobbiamo guardare **l'altezza d'onda minima** alla quale i dispositivi WEC iniziano a funzionare (parametro fornito dal costruttore) e verificare che sia compatibile con quella **minima significativa statisticamente del nostro sito**.

L'energia marina: valutazione dell'energia potenziale del sito di installazione

2. La valutazione dell'energia reale in base al dispositivo scelto per la trasformazione

Una volta scelto un dispositivo (o più dispositivi per valutazione comparativa), dobbiamo usare la **matrice di potenza** data dal costruttore, che riporta la **potenza erogata** dal dispositivo in funzione delle caratteristiche dell'onda, cioè coppi (altezza, periodo) per date direzioni d'onda:



* D. Silva, E. Rusu, and C. G. Soares, "Evaluation of various technologies for wave energy conversion in the portuguese nearshore," *Energies*, vol. 6, no. 3, pp. 1344–1364, 2013, doi: 10.3390/en6031344.

→ $P_{WEC,t}$

Le RES in Offshore

Le RES in Offshore

Abbiamo visto che le RES, sono caratterizzate da **alta intensità** (e quindi alto potenziale di produzione energetica), soprattutto **in aree prive di ostacoli**.

Un esempio è proprio il mare aperto, dove non ci sono ostacoli al moto ondoso e del vento per chilometri, e dove è minimo l'ombreggiamento, rendendo l'offshore un contesto potenzialmente ottimo per l'implementazione delle RES.

D'altro canto, l'offshore presenta degli ostacoli all'implementazione dettati da:

- L'avversità dell'ambiente marino (corrosione)
- La lontananza dalle infrastrutture di rete

Le RES in Offshore

Tuttavia, si possono trovare delle possibilità di sfruttamento nell'ambito dell' Offshore Oil&Gas, in particolare delle piattaforme offshore a fine vita.

Ad oggi nel mondo, esistono circa 6500 installazioni offshore per la produzione di oil&gas funzionanti; di queste, circa 600 devono essere dismesse (*decommissioning*) a breve, ed altre 2000 entreranno in questa fase entro il 2040.

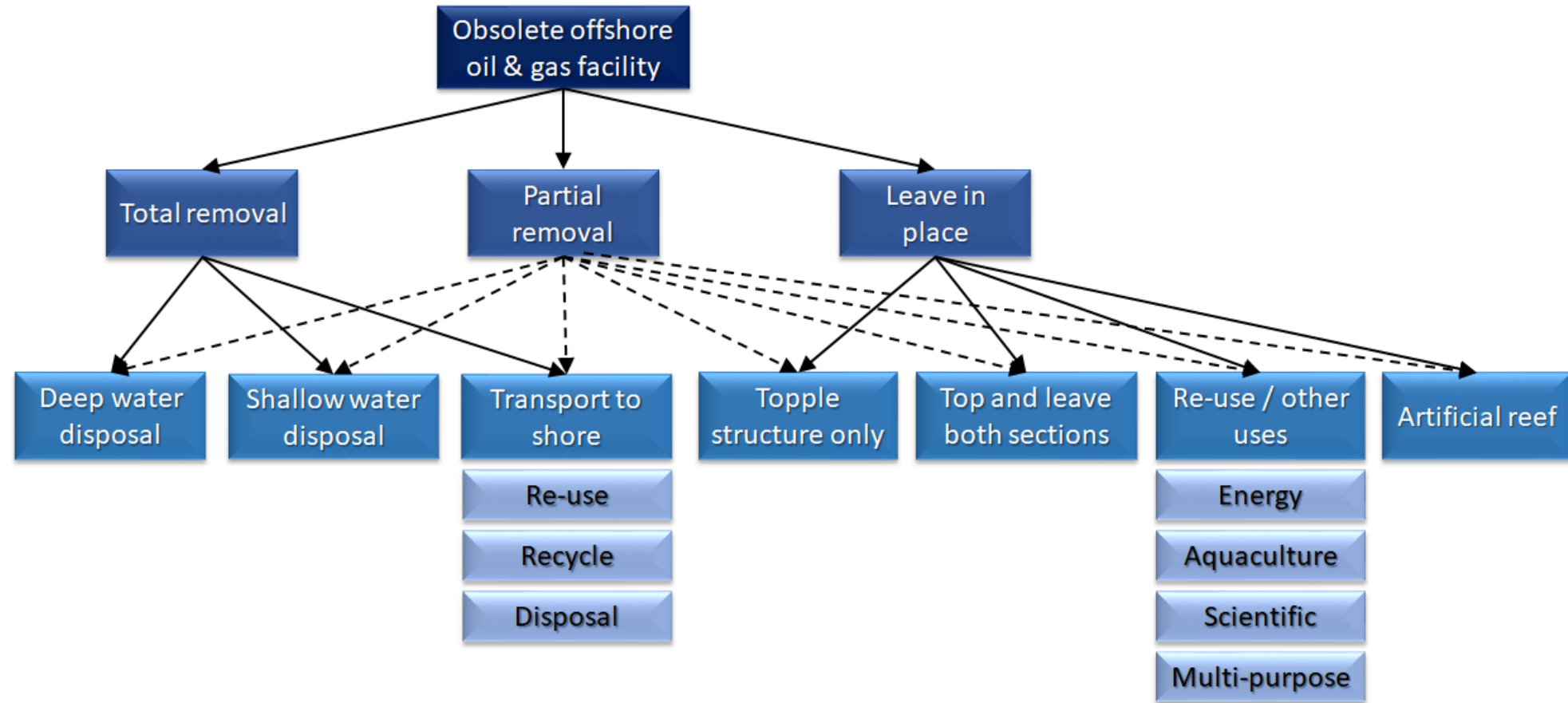
B. Sommer, A. M. Fowler, P. I. Macreadie, D. A. Palandro, A. C. Aziz, and D. J. Booth, "Decommissioning of offshore oil and gas structures – Environmental opportunities and challenges," *Science of the Total Environment*, vol. 658. 2019. doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.193.

La fase di *decommissioning* di una piattaforma offshore è lunga e complessa, e quindi costosa; comporta inoltre considerevoli impatti ambientali per l'ecosistema marino, nonché problemi di sicurezza, anche per via della mancanza di normativa specifica.

Quindi, un'alternativa alla rimozione della piattaforma stessa è la sua **conversione** (previa verifica strutturale).

La conversione delle piattaforme è anche promossa nell'ambito dello sviluppo della "Blue Economy", che prevede l'integrazione di diverse attività quali la produzione di energia appunto, l'acquacoltura, la ricerca ed il monitoraggio degli ambienti marini, trasformando le piattaforme in Multi-Purpose Offshore-Platforms (**MPOP**).

Le RES in Offshore



Sommer B, Fowler AM, Macreadie PI, Palandro DA, Aziz AC, Booth DJ. Decommissioning of offshore oil and gas structures – Environmental opportunities and challenges. *Sci Total Environ* 2019;658:973–81. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.193.

Fam ML, Konovessis D, Ong LS, Tan HK. A review of offshore decommissioning regulations in five countries - Strengths and weaknesses. *Ocean Eng* 2018;160:244–63. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.04.001.

Leporini M, Marchetti B, Corvaro F, Polonara F. Reconversion of offshore oil and gas platforms into renewable energy sites production: Assessment of different scenarios. *Renew Energy* 2019;135:1121–32. doi:10.1016/j.renene.2018.12.073.

Bernstein BB, Bressler A, Cantle P, Henrion M, DeWitt J, Kruse S, et al. Evaluating Alternatives for Decommissioning California's Offshore Oil and Gas Platforms: A technical analysis to inform state policy. *Calif Ocean Sci Trust* 2015.

Le RES in Offshore

Quindi la valorizzazione del RESs può diventare fattibile se accoppiata con il *decommissioning* delle piattaforme offshore.

Le piattaforme convertite, possono fungere da “**energy hubs**”, dove l’energia prodotta dalle RESs viene accoppiata con dei **sistemi di back-up**, magari basati sulle risorse fossibili ancora disponibili in piattaforma, oppure dove l’energia prodotta da RES viene stoccata come vettore chimico, attraverso un processo chimico (**P2X**).

Le RES in Offshore: tecnologie sviluppate *ad hoc*

SOLARE

Dal 2007 esistono **pannelli PV flottanti**, atti all'installazione su superfici idriche. I vantaggi sono:

- L'utilizzo di spazi alternativi
- La riduzione dell'ombreggiamento
- La riduzione della temperatura del pannello, grazie all'evaporazione dell'acqua.

Gli svantaggi sono:

- Costi dei materiali, che devono essere maggiormente resistenti alla corrosione
- Costi di costruzione e manutenzione
- Complessità delle strutture atte a resistere ai moti ondosi



Per questi motivi, ad oggi, sono soluzioni prevalentemente installate in specchi d'acqua circoscritti.

Le applicaizoni in mare aperto sono ancora in fase di sperimentazione.

A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, "Floating photovoltaic power plant: A review," Renew. Sustain. Energy Rev., vol. 66, pp. 815–824, 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.08.051.

K. Trapani and Redón-Santafé, "A review of floating photovoltaic installations : 2007 -2013," Prog. Photovoltaics, vol. 23, pp. 524–532, 2015, doi: 10.1002/pip.2466.

Le RES in Offshore: tecnologie sviluppate *ad hoc*

EOLICO

Come per le altre RES, esistono due tipologie di turbine eoliche sviluppate per applicazioni offshore:

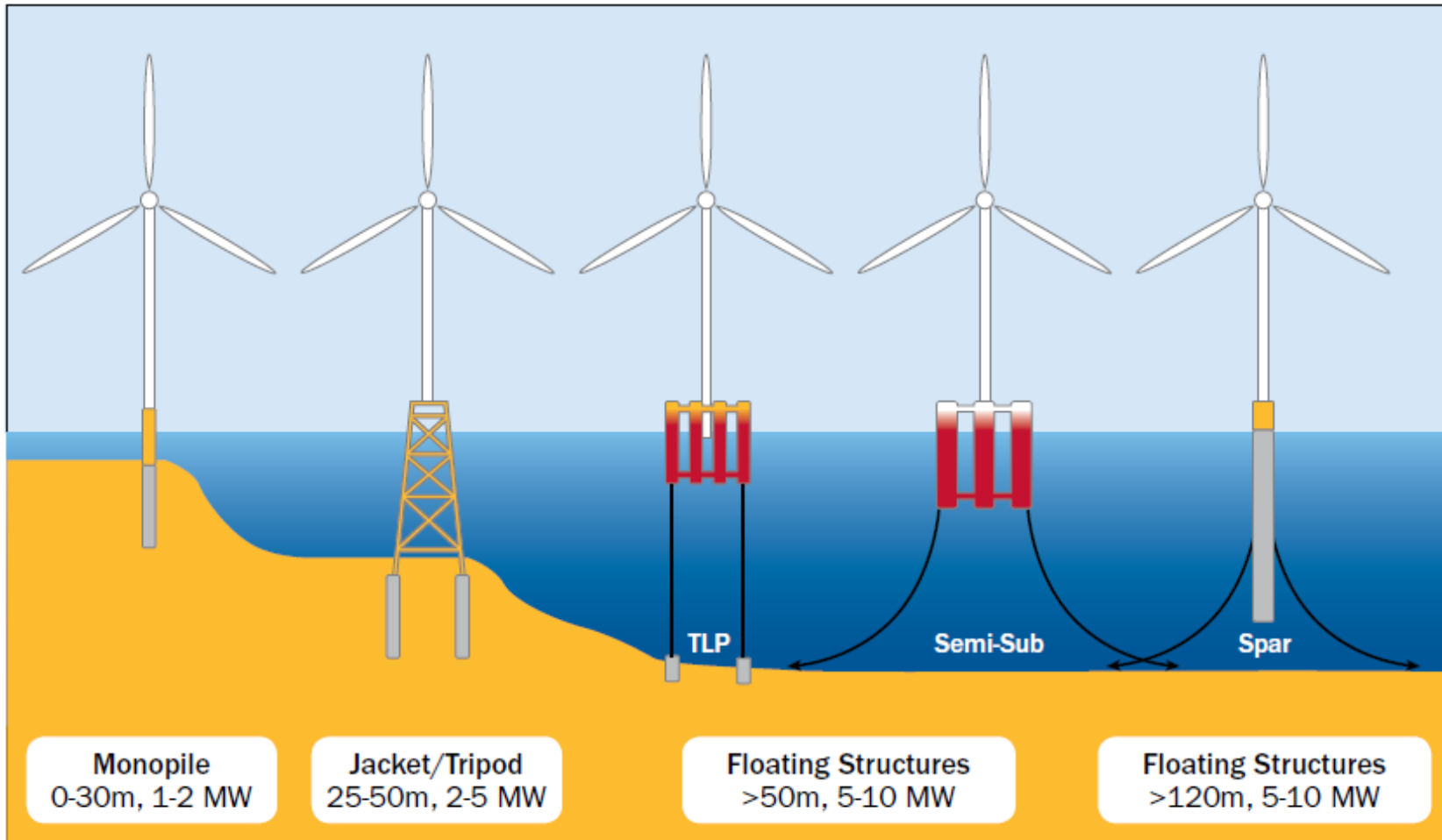
1. **galleggianti, per profondità di fondale superiori ai 50 m**, adatte all'installazione sulla superficie dell'acqua, tipicamente di mari ed oceani, all'interno della piattaforma continentale (ovvero prima che il fondale marino si inclini – scarpata continentale – verso la piana abissale).
2. **ancorate**, adatte al fondale di acque più basse.

Rispetto all'onshore, si possono avere turbine alte anche 180m, con diametri di anche 100m.

Le RES in Offshore: tecnologie sviluppate *ad hoc*

EOLICO

European Wind Energy Association (EWEA). *Deep water - The next step for offshore wind energy*. 2013



Le RES in Offshore: tecnologie sviluppate *ad hoc*

EOLICO

I vantaggi, rispetto all'applicazione onshore, sono:

- **Produzione energetica più stabile e maggiore** (a parità di pale installate): lontano dalla costa i venti sono più stabili e veloci
- Un ridotto impatto visivo (la piattaforma continentale si estende anche per centinaia di km dalla linea di costa).

Gli svantaggi sono:

- **Costi dei materiali**, che devono essere maggiormente resistenti alla corrosione
- Costi di **costruzione, installazione e manutenzione**
- **Complessità** della progettazione di strutture atte a resistere ai moti ondosi



Al 2021, la capacità mondiale di generazione elettrica eolica installata è di 770 GW (1488 TWh) onshore e di 54 GW offshore (100 TWh).

IRENA, RENEWABLE ENERGY STATISTICS 2022. 2022. [Online]. Available: www.irena.org

Le RES in Offshore: tecnologie sviluppate *ad hoc*

Beleolico è il primo parco eolico marino costruito nel Mediterraneo

<https://renexia.it/beleolico/>

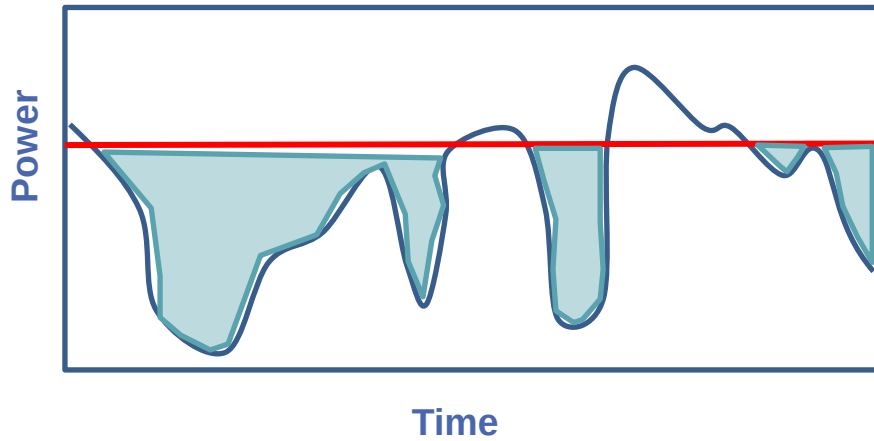


- **Luogo:** Rada esterna del Porto di Taranto (TA).
- **Descrizione:** L'impianto è composto da 10 turbine per una potenza complessiva di circa 30 MW ed una conseguente produzione stimata di oltre 58.000 MWh/anno, pari al fabbisogno energetico di 18500 famiglie / 60000 persone.

Integrazione delle RES

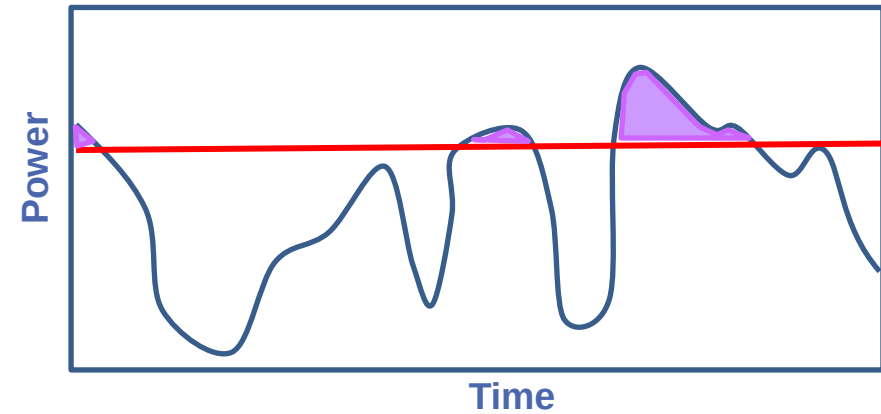
Sfide poste dalle RES

1. ALTA VARIABILITA'
2. DIFFICILE PREVEDIBILITA'



VALLEY FILLING

per compensare la mancata produzione



PEAK SHAVING

per non sprecare il surplus

Sfide poste dalle RES

Possibili soluzioni:

1. **Integrare** tra loro le RES
2. Integrare le RES con altre fonti di energia, e.g. combustibili fossili (**sistemi ibridi**)
3. **Integrare** le RES con il surplus **stoccato**:
 - a. **A breve termine con batterie**
 - b. **A lungo termine** con diverse forme di stoccaggio (**P2X**) + **sistemi ibridi**

Sfide poste dalle RES

3. Integrare le RES con il surplus stoccato come P2X

Le strategie di P2X sono state sviluppate per stoccare a lungo termine l'energia prodotta dalle RES sottoforma di combustibili sintetici (detti anche **vettori energetici**), che hanno caratteristiche (e.g. composizione chimica) e proprietà (e.g. potere calorifico) del tutto simili ai corrispondenti fossili.

Questi combustibili possono essere:

1. **Liquidi**: per cui si parla di Power to Liquid (**P2L**), come ad esempio metanolo, dimetil etere, ammoniaca...
2. **Gassosi**: per cui si parla di Power to Gas (**P2G**), come ad esempio l'idrogeno o il metano (SNG: synthetic natural gas).

Il vantaggio dei vettori energetici è quello di rendere l'energia prodotta da RESs disponibile in modo **differito**, nel tempo e nello spazio.

VETTORE	Potere calorifico inferiore [MJ/kg]	Densità [kg/m ³]	Stato fisico alle condizioni ambientali
Idrogeno	120	0.09	Gas
SNG	50	0.8	Gas
Metanolo	23	790	Liquid
DME	28	713	Gas
AmmoniaCA	22,5	0.73	Gas

Esempio di integrazione delle RES in contesto offshore

Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate

Piattaforma GARIBALDI C, nel nord del Mare Adriatico:

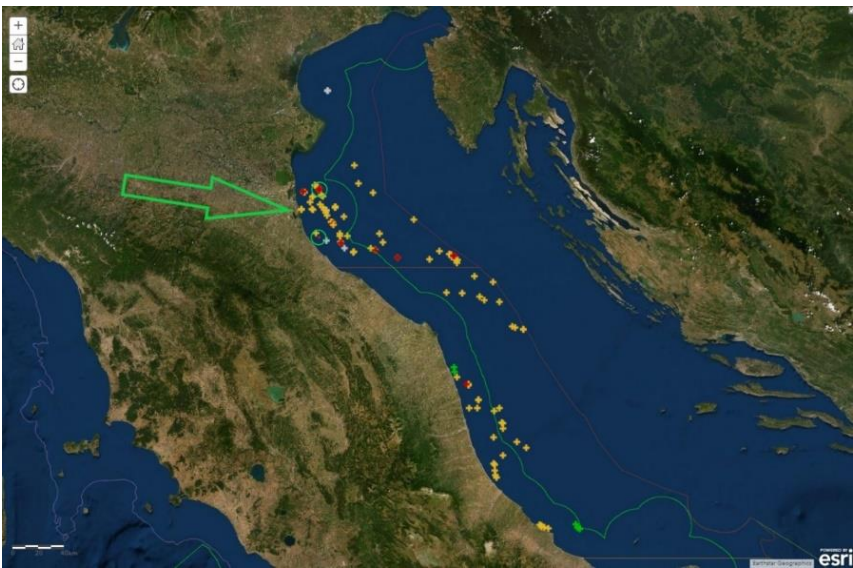


dimensioni: 46 m x 26 m, 62 m slv

distanza dalla costa: 18 km

produzione: gas naturale (97.5 % peso di metano), 565 kg/h

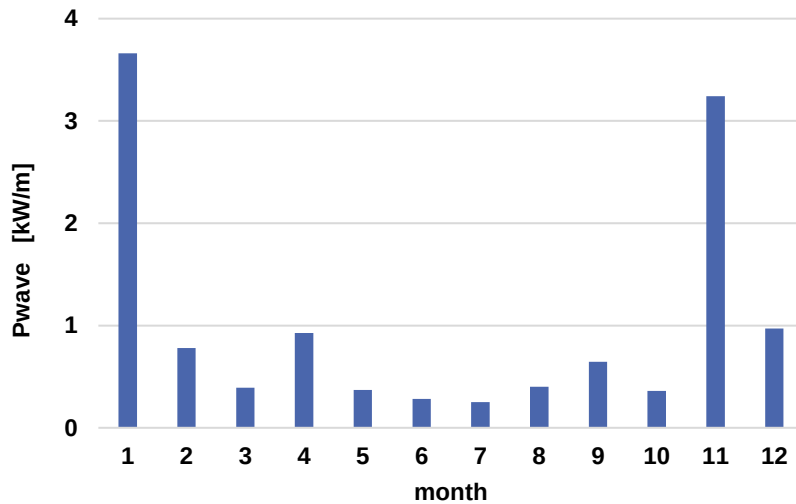
<https://unmig.mise.gov.it/index.php/it/dati/dismissione-mineraria-delle-piattaforme-marine/elenco-piattaforme-in-dismissione>



° Est	° Nord
12,48	44,21

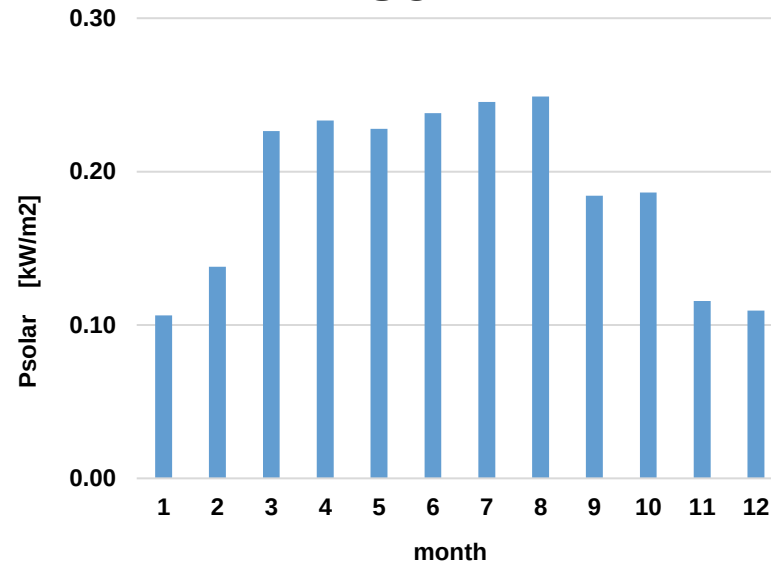
Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate

ONDE



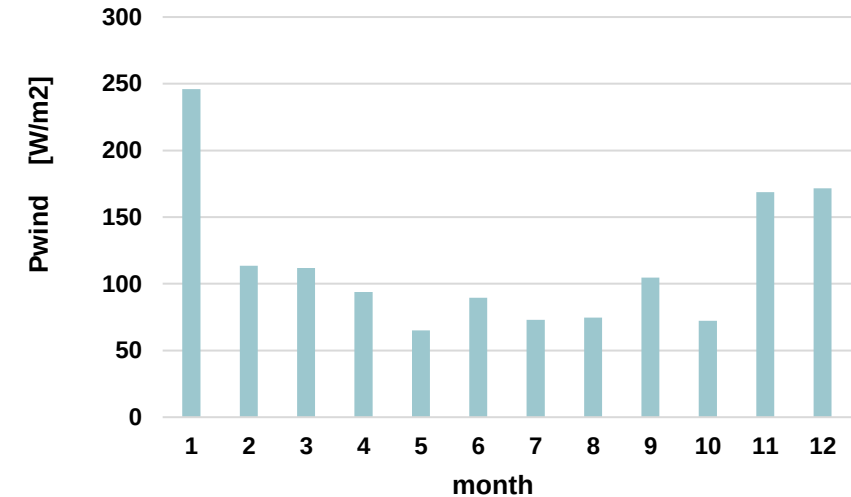
Average hourly power: 1.02 kW/m

SOLE



Average hourly power: 0.19 kW/m2

VENTO



Average hourly power: 0.11 kW/m2

Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate



SOLE

Pannello solare a media efficienza, per coprire circa 900 m².

Energia elettrica prodotta da solare: 2.05E+03 kWh

Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate



VENTO

Turbina ad asse orizzontale da 6.3 MW

v cut-in [m/s]	v cut-out [m/s]	v nominale [m/s]	Dimensioni [m]
3	30	11.5	H = 75-85 D = 152

Perché dai dati di sito risultava:

- velocità media annuale 4.2 m/s
- moda velocità = 2 m/s
- velocità massima 17 m/s

Energia elettrica prodotta da eolico: 3.47E+06 kWh

Ore di fermo: 25%

Ore alla Potenza nominale: 434 (5%)

Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate

MARE

Point adsorber (dispositivo a corpo oscillante)



Potenza nominale (W)	Hs cut in (m)	Potenza d'onda ottimale (kW/m)	Dimensioni (m)	Profondità massima (m)
30	0.1	0.1 – 6.5	H 8.5m D 1.6m Dbuoy 4m	10-100 (Nearshore)

Perché dai dati di sito risultava:

- altezza minima d'onda = 0.01 m
- altezza media = 0.5 m
- altezza massima 8.5 m

Energia elettrica prodotta da eolico: 5.05 kWh

Ore di fermo: 41%

Esempio sistema ibrido offshore – RES integrate

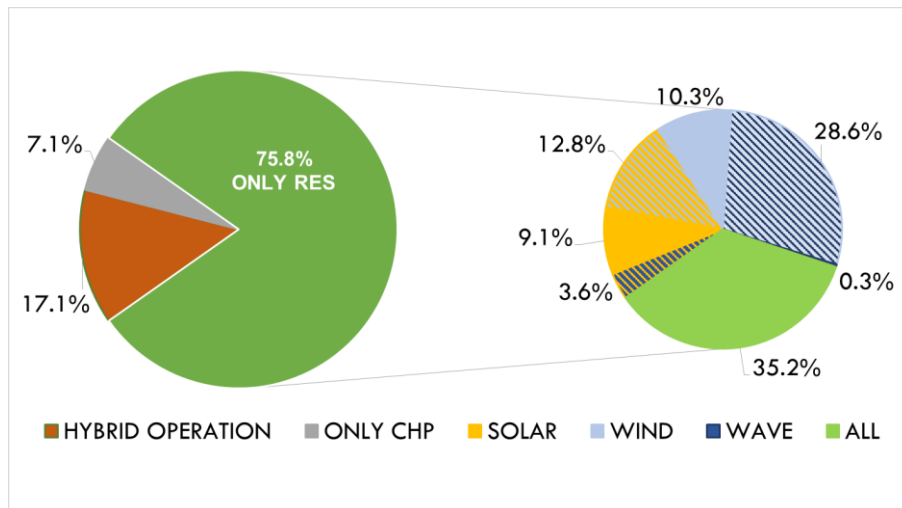
Supponiamo di voler convertire il metano residuo in metanolo, usando l'energia da RES e da metano stesso.

Cerchiamo dunque il mix del sistema ibrido RES-metano ottimale come:

massimizzando il tempo di fornitura di energia all'impianto coperta dalle RES

Es. per fare 150 kg di metanolo al giorno:

- Optimal **energy mix** = 950 m² of PV panels + 11.5 MW wind turbines + 50 WECs



Quando non abbiamo RES (7 % del tempo) o se coprono solo parzialmente il fabbisogno energetico dell'impianto (17 % del tempo), usiamo parte del metano in una unità cogenerativa.

Ci sono anche dei momenti di surplus energetico delle RES, che potrebbe essere stoccato e riutilizzato ad integrazione del CHP.



Valeria CASSON MORENO - Università di Pisa - valeria.cassonmoreno@unipi.it