



UNIVERSITÀ DI PISA

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Tecnica e Tecnologie delle Strutture

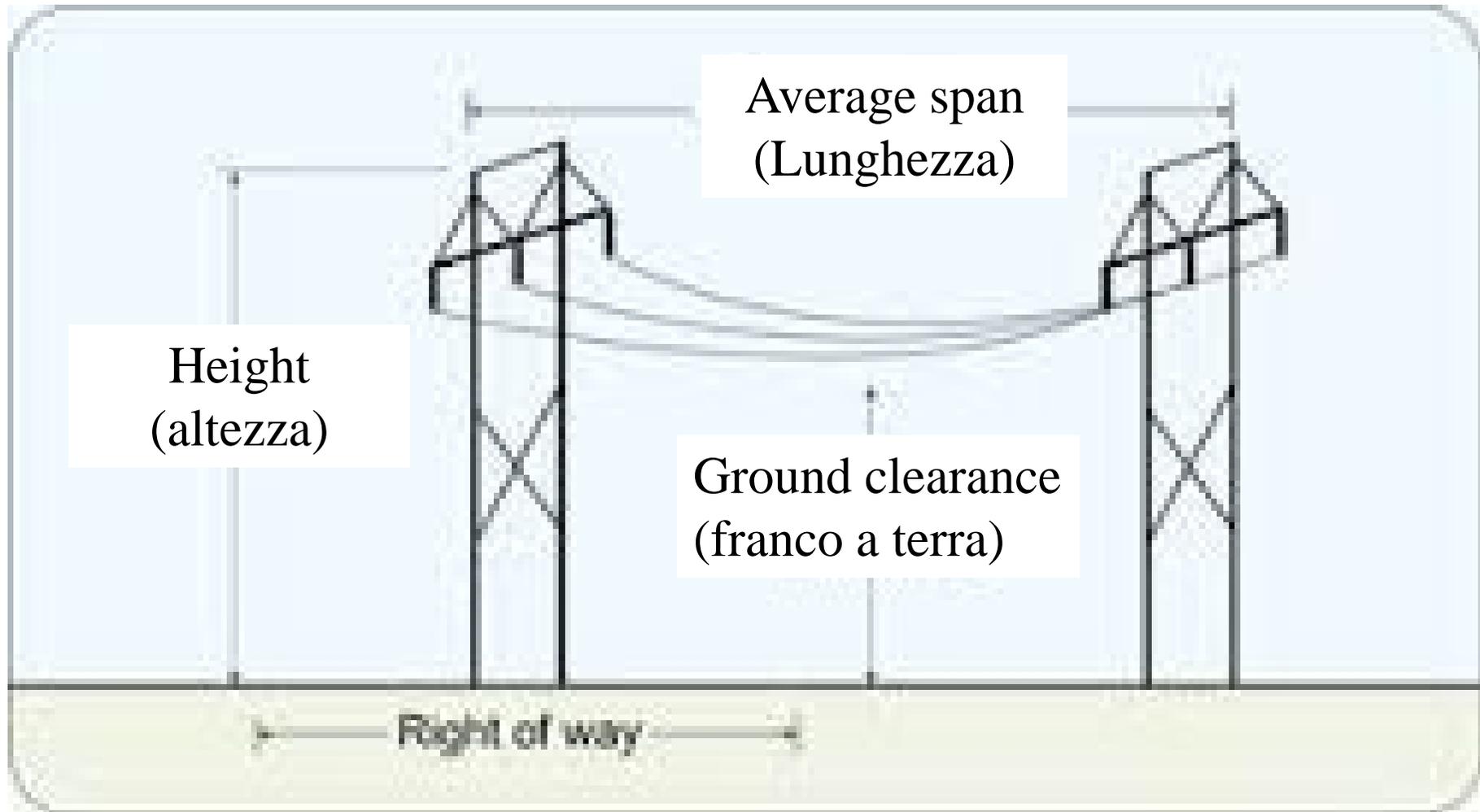
A.A. 2015/2016

LINDA GIRESINI

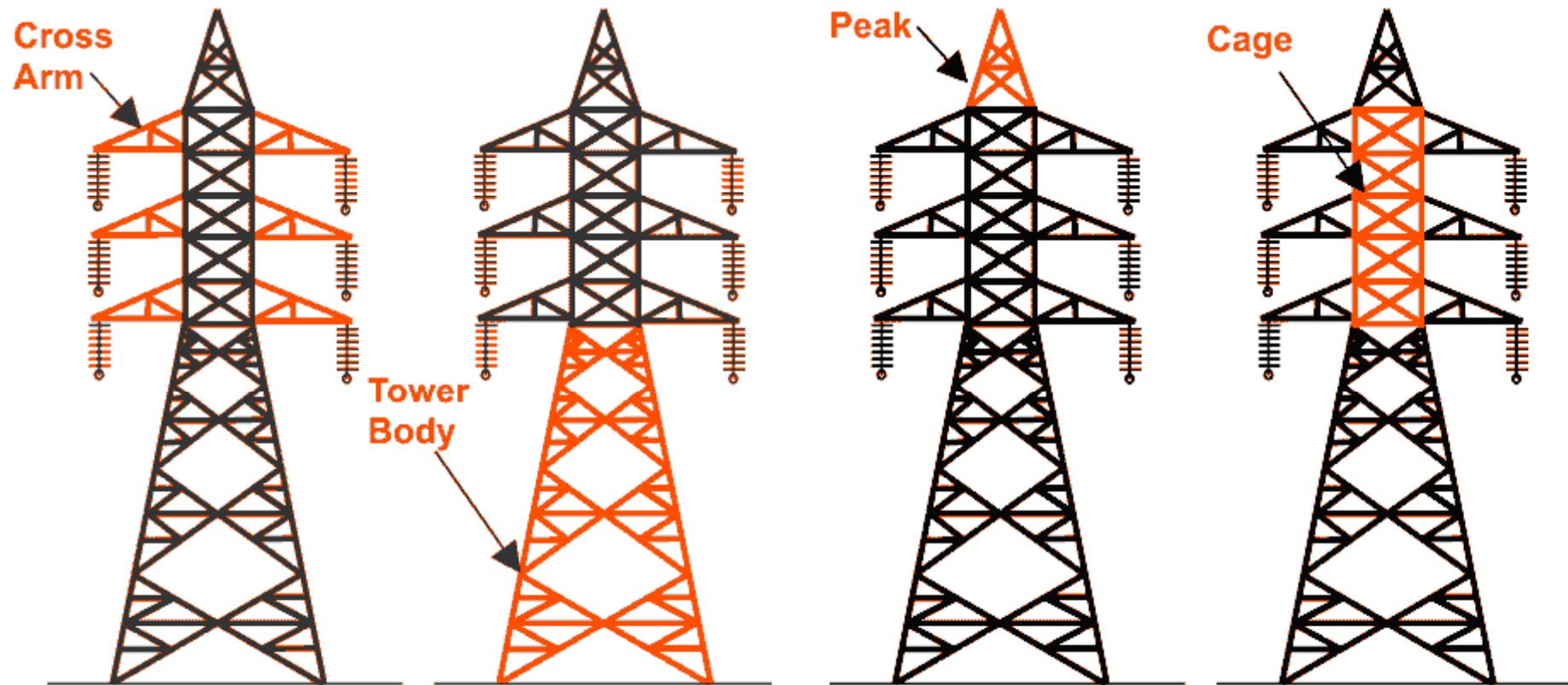
linda.giresini@unipi.it

Elettrodotti e aerogeneratori

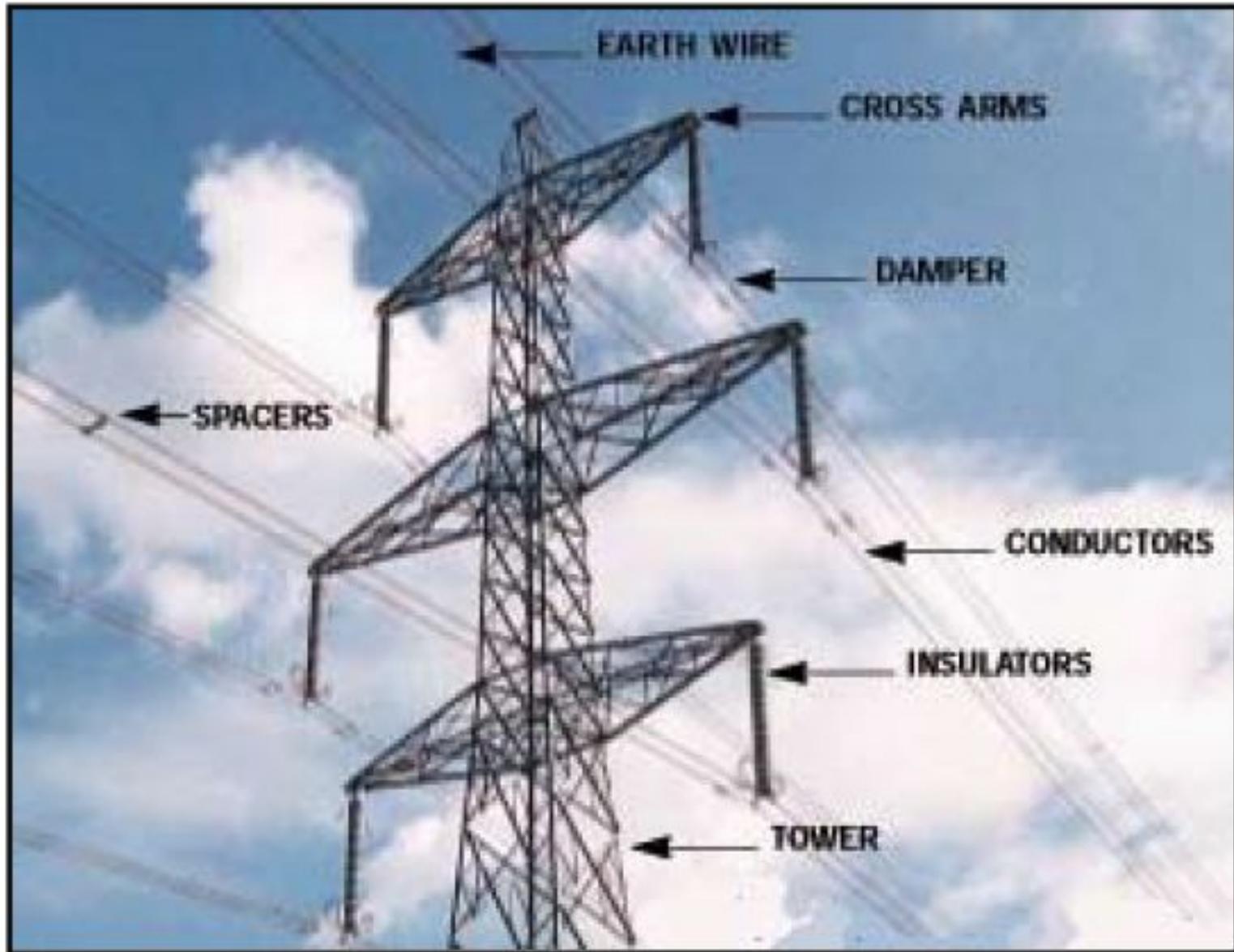
ELETTRODOTTI



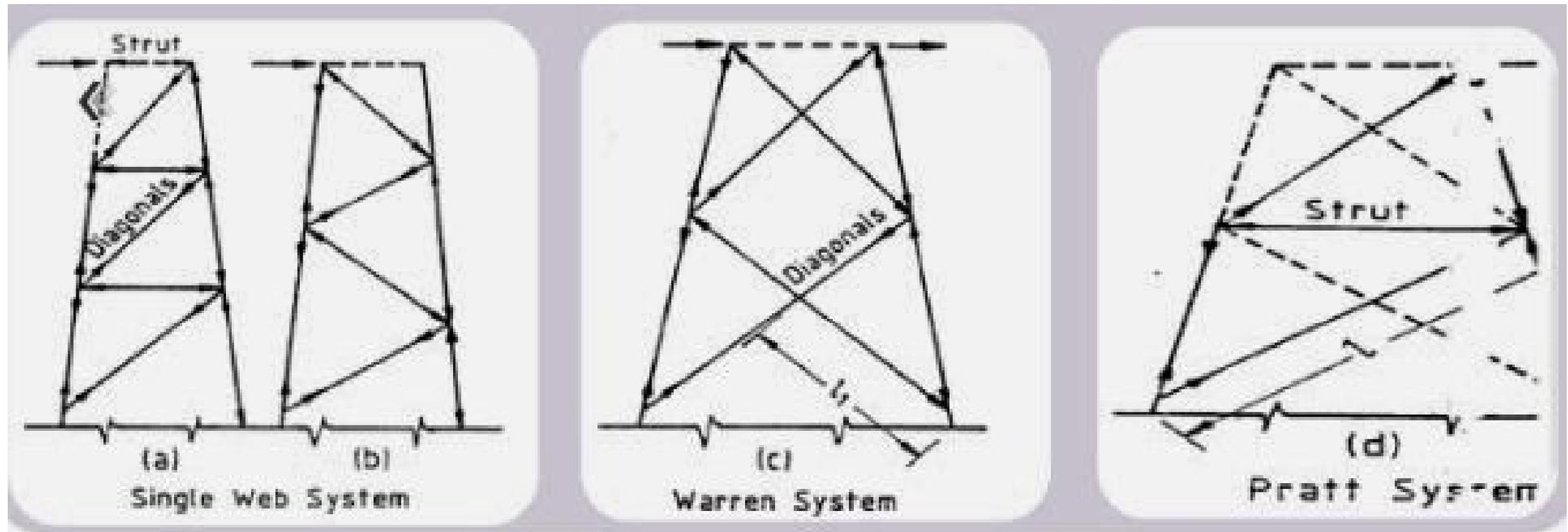
TRALICCI PER ELETTRODOTTI



TRALICCI PER ELETTRODOTTI



TIPOLOGIE DI TRALICCI



CONDUTTORI



CONDUCTOR DATA SHEET ALUMINUM CONDUCTORS STEEL REINFORCED (ACSR)



ASTM SIZES

Code Name	Area			Equivalent copper area	Stranding and wire diameter		Approx. overall diameter	Weight			Rated Strength	Maximum dc resistance at 20 °C		
	Aluminium	Steel	Total		Aluminium	Steel		Aluminium	Steel	Total				
	AWG or MCM	mm ²	mm ²		mm ²	AWG or MCM		mm ²	mm	mm			mm	kg/km
PELICAN	477	242.30	13.46	255.80	300	152.26	18/4.14	1/4.14	20.70	668.0	105	773	52.30	0.1186
FLICKER	477	241.60	31.40	273.00	300	152.26	24/3.58	7/2.39	21.49	669.0	245	914	76.78	0.1195
HAWK	477	241.60	39.49	281.10	300	152.26	26/3.44	7/2.68	21.80	669.0	306	975	86.73	0.1195
HEN	477	241.30	56.30	297.60	300	152.26	30/3.20	7/3.20	22.40	670.0	440	1110	105.16	0.1200
OSPREY	556.5	282.50	15.69	298.20	350	172	18/4.47	1/4.47	22.35	779.0	122	901	60.52	0.1017
PARAKEET	556.5	282.30	36.60	318.90	350	172	24/3.87	7/2.58	23.22	783.0	286	1069	88.29	0.1023
DOVE	556.5	282.60	45.92	328.50	350	172	26/3.72	7/2.89	23.55	783.0	359	1142	101.10	0.1022
EAGLE	556.5	282.10	65.82	347.90	350	172	30/3.46	7/3.46	24.21	784.0	515	1298	122.90	0.1026
PEACOCK	605	306.10	39.78	345.90	381	187	24/4.03	7/2.69	24.20	849.0	311	1160	95.86	0.0943
SQUAB	605	305.80	49.81	355.60	381	187	26/3.87	7/3.01	24.51	848.0	389	1237	109.60	0.0944
WOODDUCK	605	307.10	71.65	378.80	381	187	30/3.61	7/3.61	25.25	853.0	560	1413	129.00	0.0943
TEAL	605	307.10	69.62	376.70	381	187	30/3.61	19/2.16	25.24	853.0	545	1398	136.10	0.0943
KINGBIRD	636	323.00	17.95	341.00	400	197	18/4.78	1/4.78	23.90	891.0	140	1031	69.72	0.0890
ROOK	636	323.10	41.88	365.00	400	197	24/4.14	7/2.76	24.84	896.0	327	1223	101.00	0.0894
GROSBEAK	636	321.80	52.49	374.30	400	197	26/3.97	7/3.09	25.15	892.0	410	1302	111.90	0.0897
SCOTER	636	322.60	75.26	397.90	400	197	30/3.70	7/3.70	25.90	897.0	588	1485	135.50	0.0897
EGRET	636	322.60	73.54	396.10	400	197	30/3.70	19/2.22	25.90	897.0	576	1473	140.60	0.0897
FLAMINGO	666.6	337.30	43.72	381.00	419	206	24/4.23	7/2.82	25.34	935.0	342	1277	105.50	0.0856
GANNET	666.6	338.30	54.90	393.20	419	201	26/4.07	7/3.16	25.76	938.0	429	1367	117.30	0.0854
CROW	715.5	361.60	46.88	408.50	450	221	54/2.92	7/2.92	26.28	1003.0	366	1369	115.20	0.0799
STILT	715.5	363.30	46.88	410.20	450	222	24/4.39	7/2.92	26.32	1007.0	366	1373	113.30	0.0795

CONDUTTORI

DCm-578 (3-78)



CONDUCTOR 403 mm² ACSR 24/7

Code Name Drake

Rated Breaking Strength 140 118 N

Diameter 28 mm

Tension Limitations:

Initial, -40°C, 33% = 46 701 N

Final, -40°C, 25% = 35 030 N

Loaded, 18°C, 50% = 70 059 N

Final, 15.5°C, 18% = 25 221 N

Computed by _____ Date _____

INITIAL SAG CALCULATIONS
FINAL

LOADING Heavy

Linear Force Factor:

Dead Load Force (W') 15.9657 N/m

13 mm Ice (W'') 30.5625 N/m

0.19152 kPa Wind 10.2551 N/m

Resultant: (W''') 36.6142 N/m

Area (A) 468 mm²

Temp. Coeff. of Linear Exp.:

0.000 0 18.9 per °C

CONDUTTORI-AZIONI

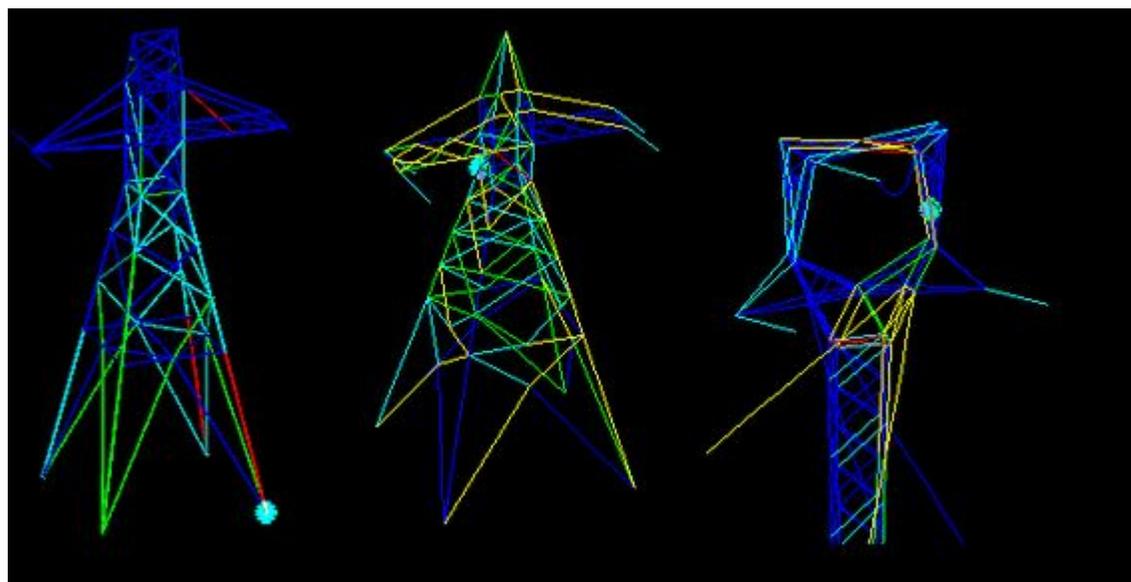
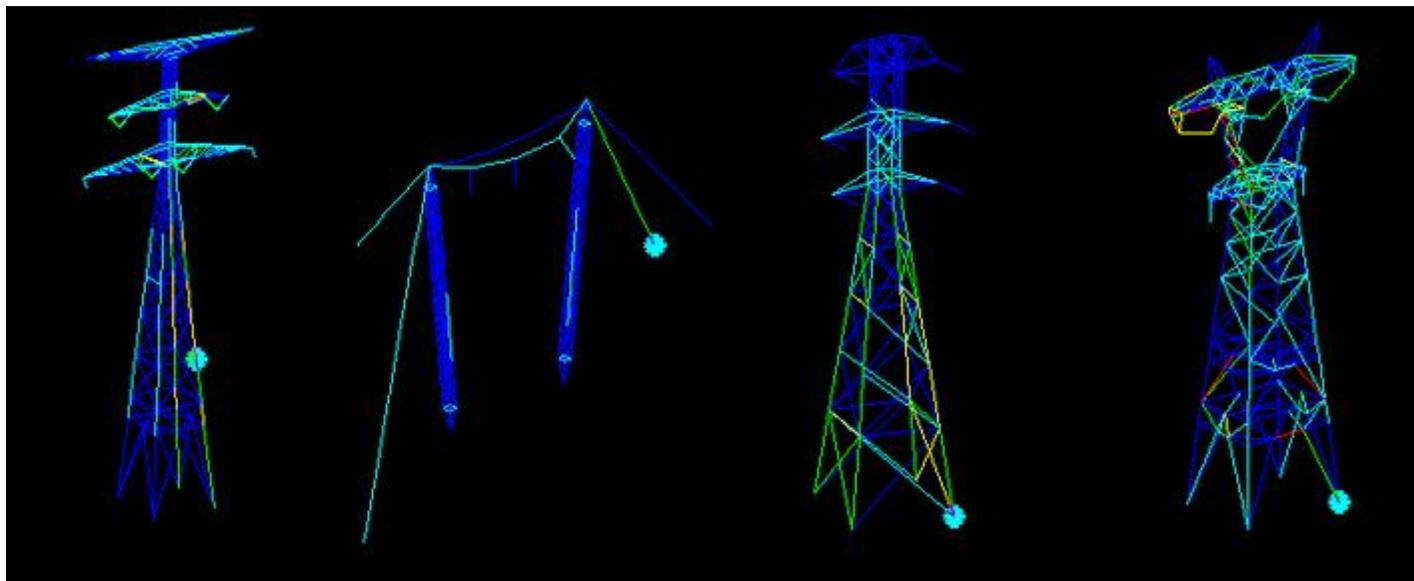
Peso proprio

Vento

Ghiaccio (spessore radiale)

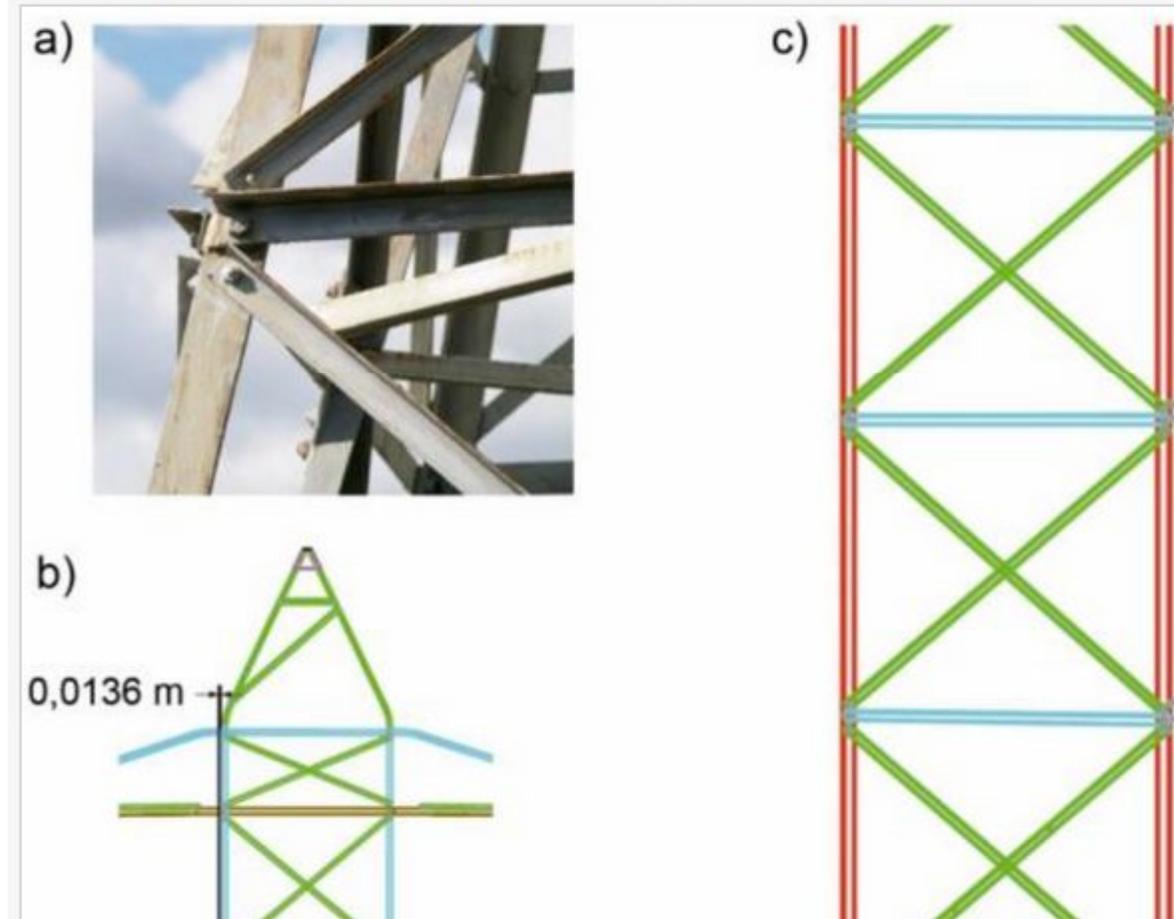
Temperatura

MODELLI A ELEMENTI FINITI

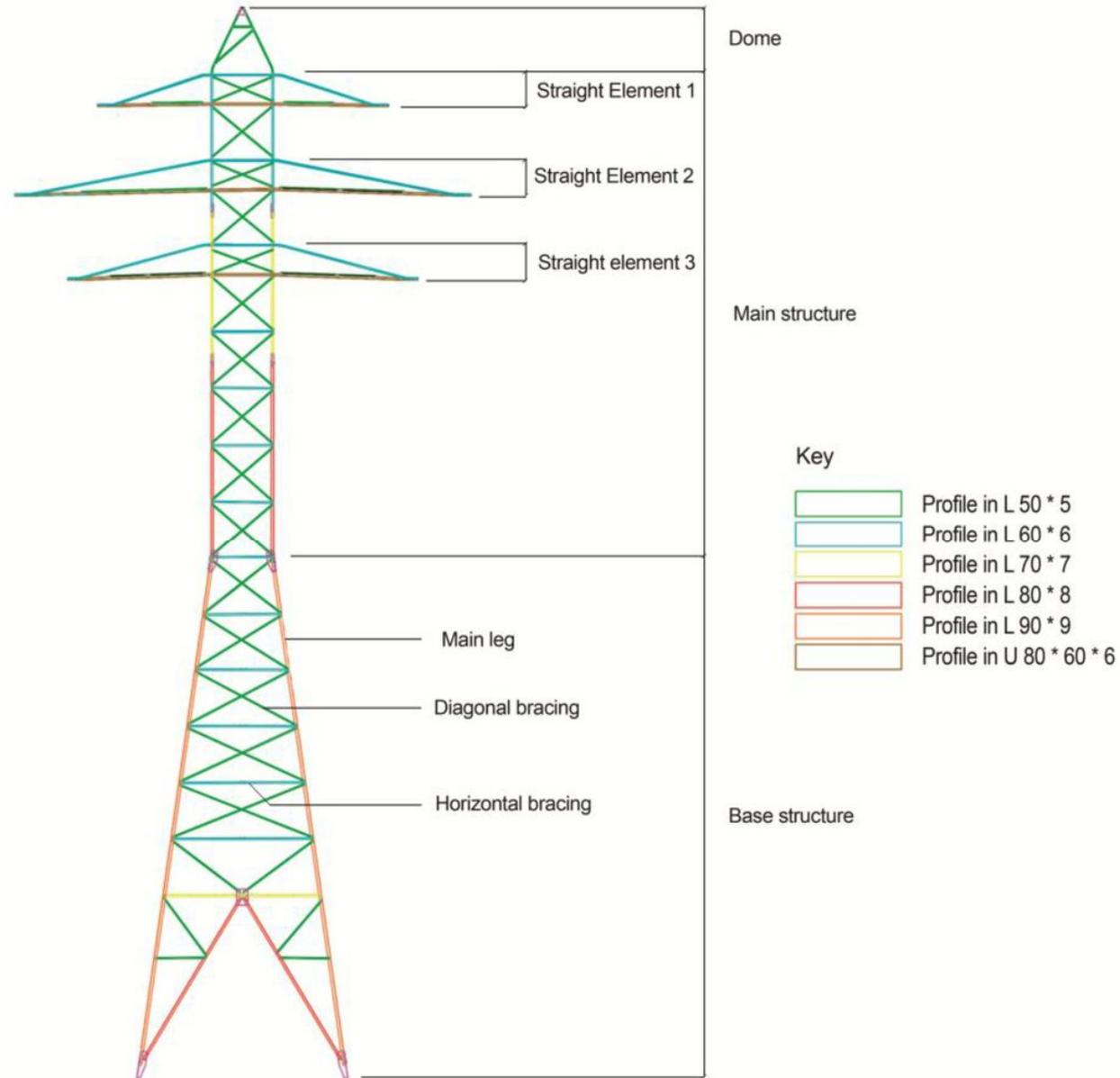


MODELLAZIONE E CONCEZIONE STRUTTURALE

Figure 1. (a) Detail of the bolted connections with the inclusion of the eccentricity present at the linkage between profiles; (b) vertical deviation of the main body of tower; (c) horizontal deviation in the members of the main body of tower.

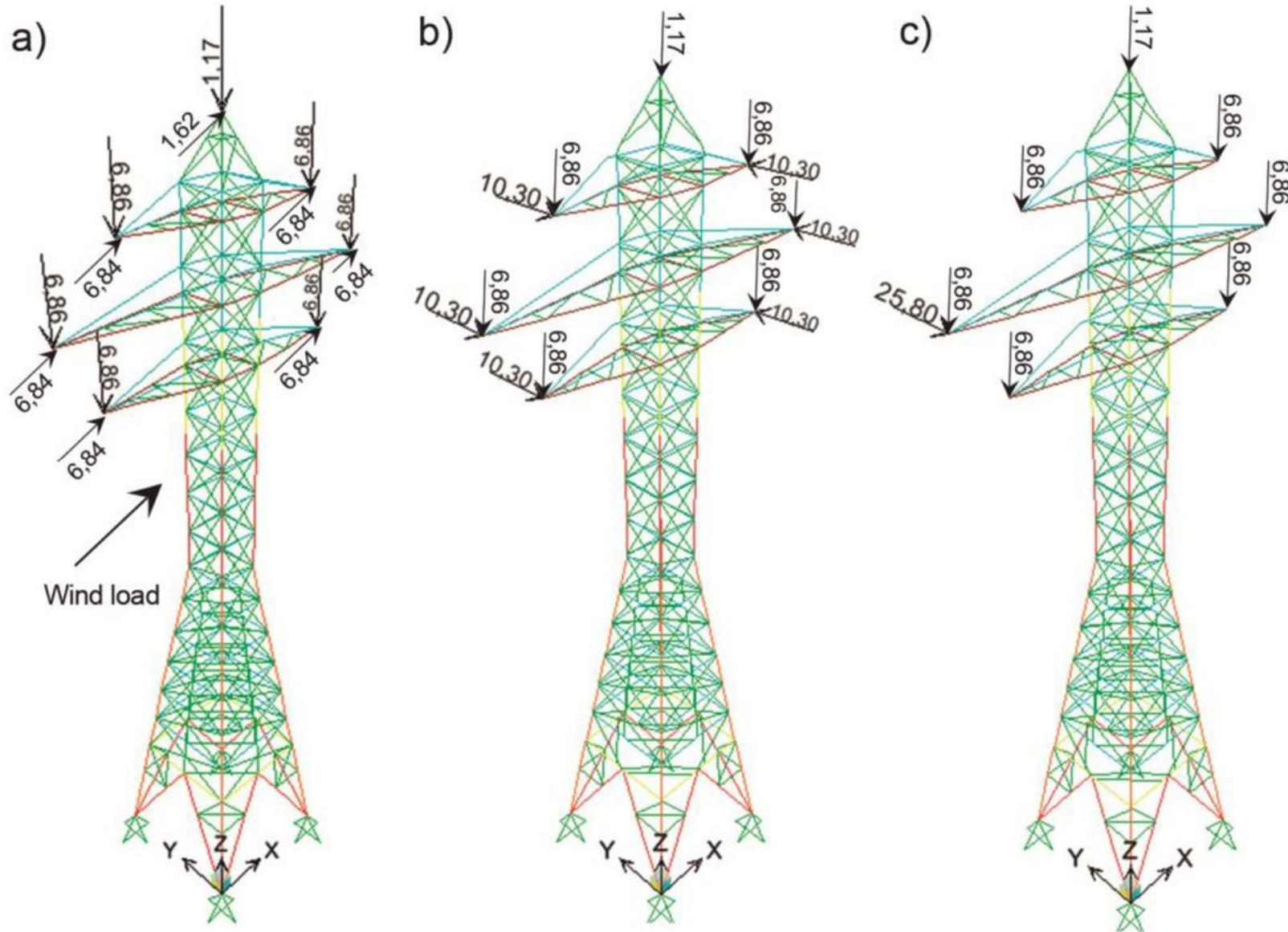


MODELLAZIONE E CONCEZIONE STRUTTURALE



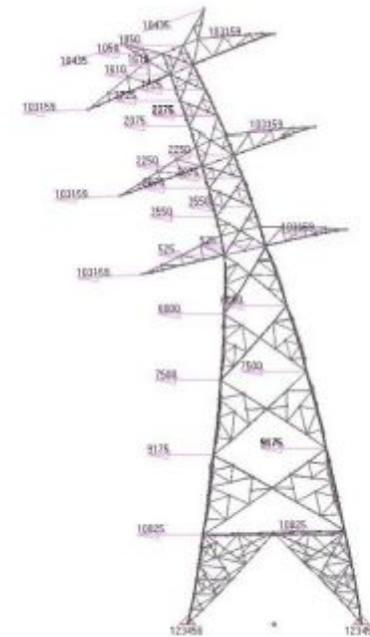
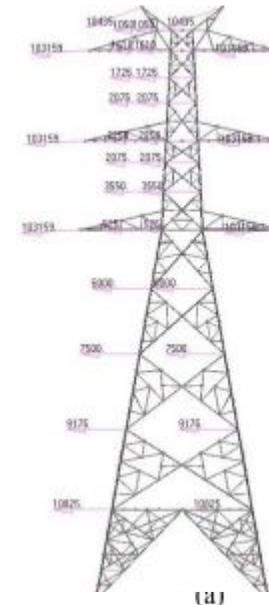
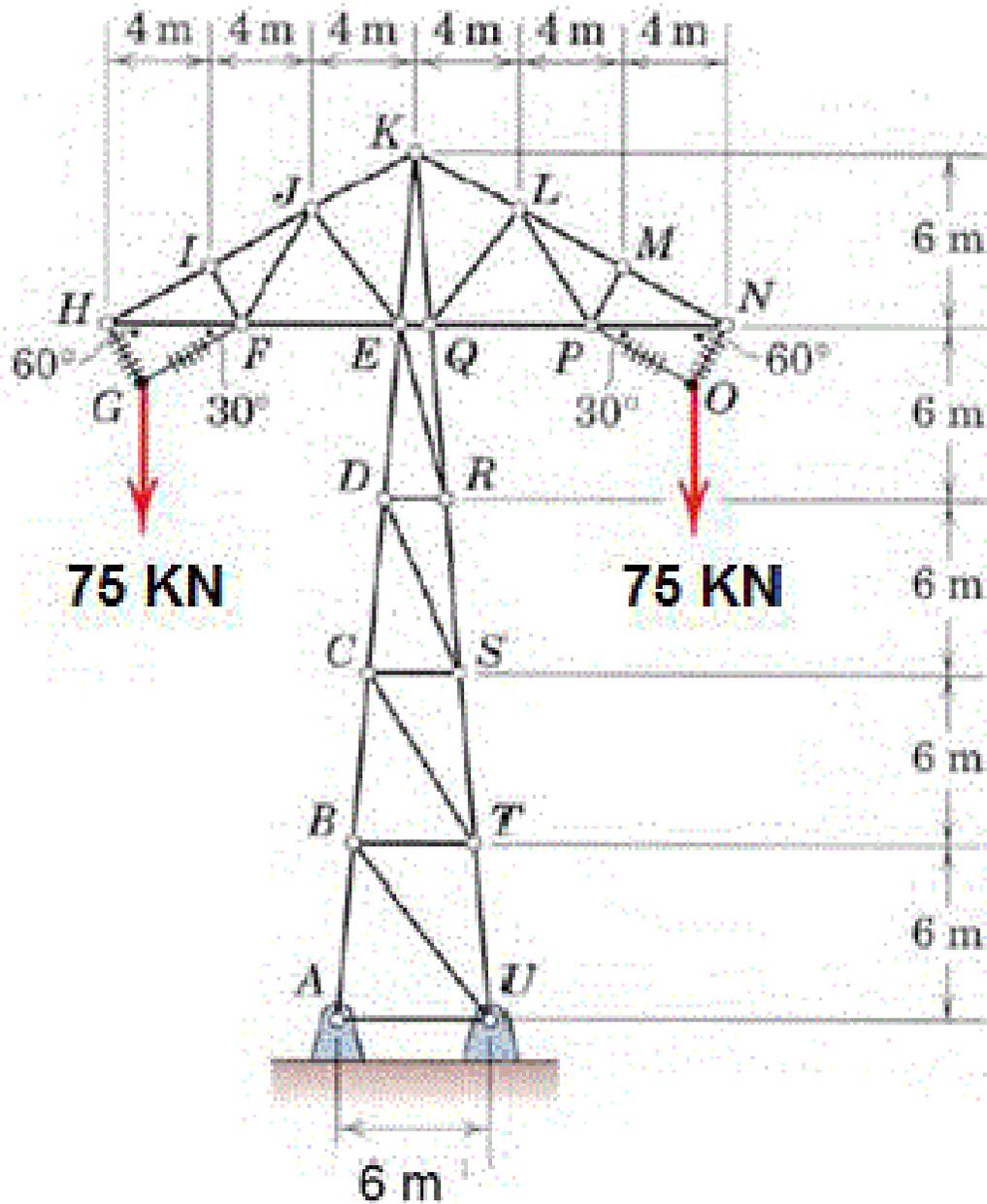
Geometrical Issues on the Structural Analysis of Transmission Electricity Towers Thanks to Laser Scanning Technology and Finite Element Method (Borja Conde, Alberto Villarino, Manuel Cabaleiro and Diego Gonzalez-Aguilera), *Remote Sens.* **2015**, 7(9), 11551-11569; doi:[10.3390/rs70911551](https://doi.org/10.3390/rs70911551)

CASI DI CARICO



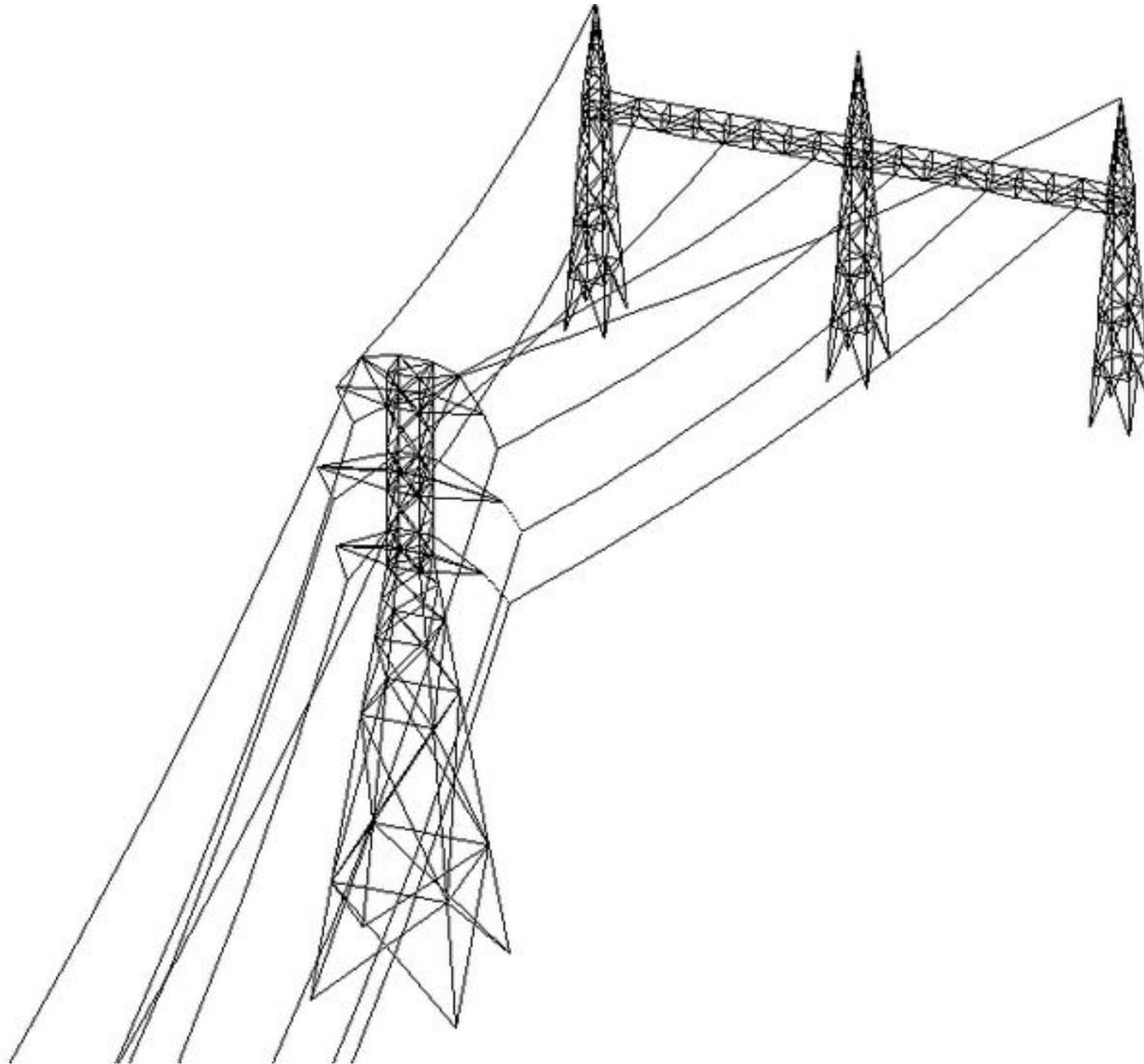
Geometrical Issues on the Structural Analysis of Transmission Electricity Towers Thanks to Laser Scanning Technology and Finite Element Method (Borja Conde, Alberto Villarino, Manuel Cabaleiro and Diego Gonzalez-Aguilera), *Remote Sens.* **2015**, 7(9), 11551-11569; doi:[10.3390/rs70911551](https://doi.org/10.3390/rs70911551)

SCHEMI STATICI PER TORRI DA ELETTRODOTTO



(b)

SCHEMI STATICI PER TORRI DA ELETTRODOTTO



SISTEMI DI MONTAGGIO



A helicopter starts the process of stringing a high-voltage transmission line

TORRI EOLICHE o AEROGENERATORI

IMPIANTI EOLICI-PRECURSORI



Struttura costruita per sfruttare l'energia del vento (energia eolica) e attraverso l'utilizzo di pale per trasformarla in energia meccanica utilizzabile per scopi o processi agricoli, artigianali e industriali.

AEROGENERATORI

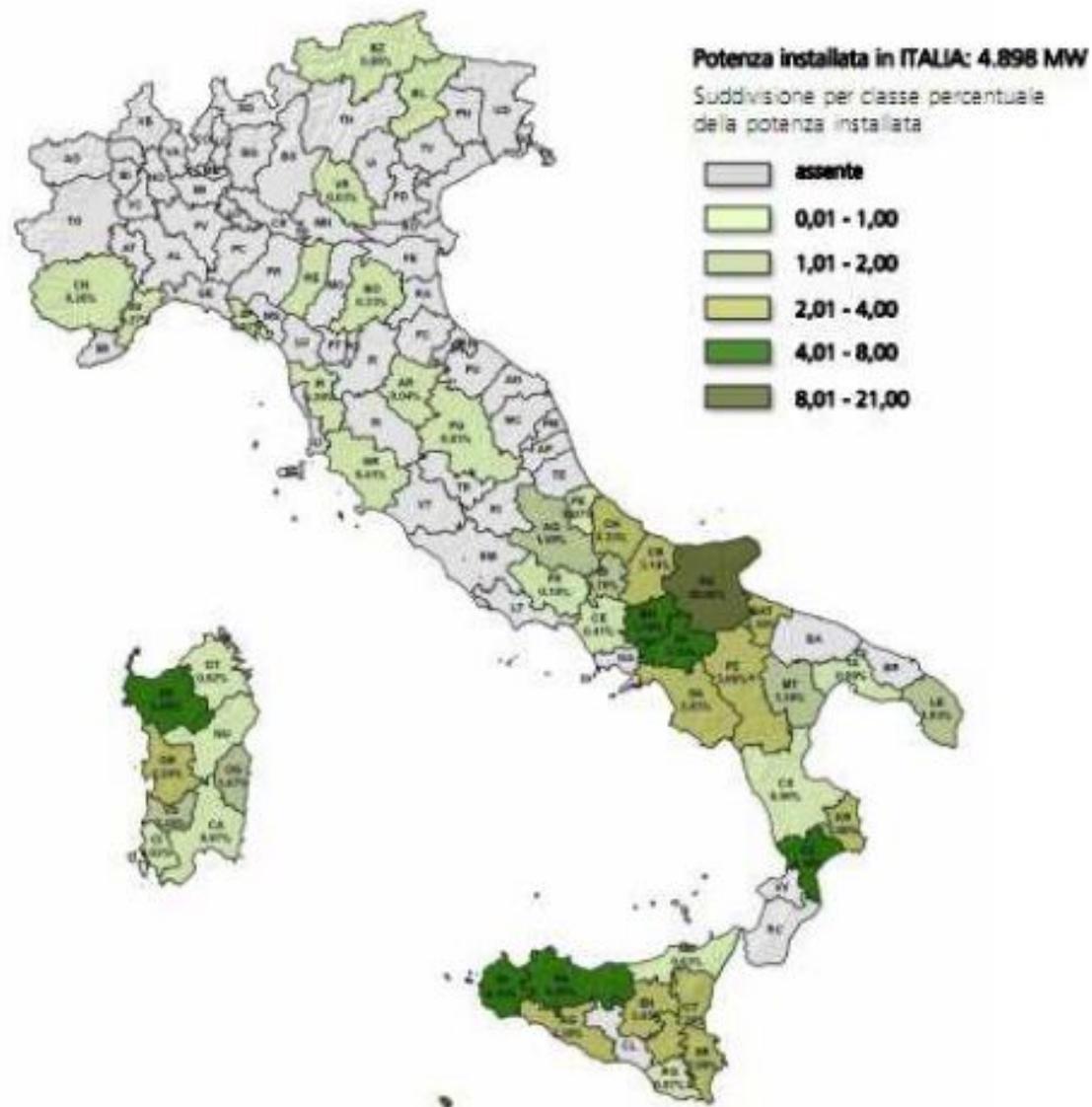
- **Lunghezza fino a 80 metri**
- **Peso fino a 7 tonnellate l'una**

In Italia in funzione più di 5300 **aerogeneratori** di varia taglia per una potenza installata di circa 6500 MW.



DISTRIBUZIONE DI POTENZA NELLA PENISOLA ITALIANA

Distribuzione provinciale % della potenza a fine 2009



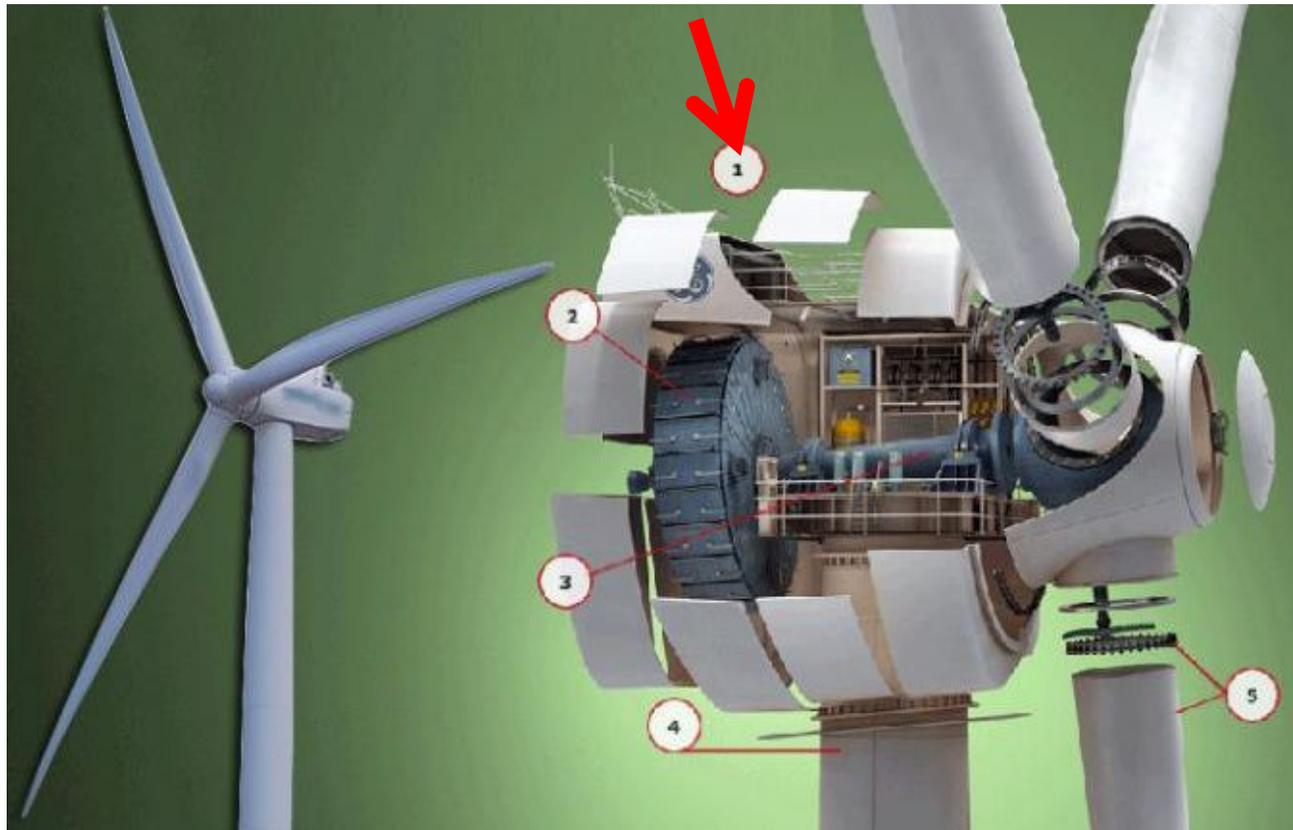
COMPONENTI PRINCIPALI DI TORRI EOLICHE

Campione: **modello GE4.1-113** (potenza di 4.1 MW e 113 metri di diametro del rotore)

1. NAVICELLA O GONDOLA:

Altezza e larghezza 4 metri, lunghezza 10 m

Le navicelle delle torri off-shore (installate cioè in mare aperto) dovranno comunque essere sempre grandi abbastanza da permettere l'atterraggio di un elicottero.



COMPONENTI PRINCIPALI DI TORRI EOLICHE

Campione: **modello GE4.1-113** (potenza di 4.1 MW e 113 metri di diametro del rotore)

3. ALBERO DI TRASMISSIONE:

È il componente più delicato del sistema. Tenuto in rotazione dalle pale, la trasmissione dell'energia meccanica dal mozzo (dove sono ancorate le pale) al generatore elettrico (2) può essere mediata da ingranaggi, da giunti a bagno d'olio o, da un sistema di magneti permanenti.



COMPONENTI PRINCIPALI DI TORRI EOLICHE

Campione: **modello GE4.1-113** (potenza di 4.1 MW e 113 metri di diametro del rotore)

4. TORRE:

È in genere costruita impilando moduli lunghi 32 metri (detti "conci"), fino a raggiungere l'altezza determinata dal progetto, che varia anche in base al luogo di installazione. Altezza al mozzo almeno 96 metri, misura che porta l'altezza della costruzione Pala 56 m.

Il diametro della torre varia, in funzione del progetto e dell'altezza, da 4 metri a 1 metro circa.



COMPONENTI PRINCIPALI DI TORRI EOLICHE

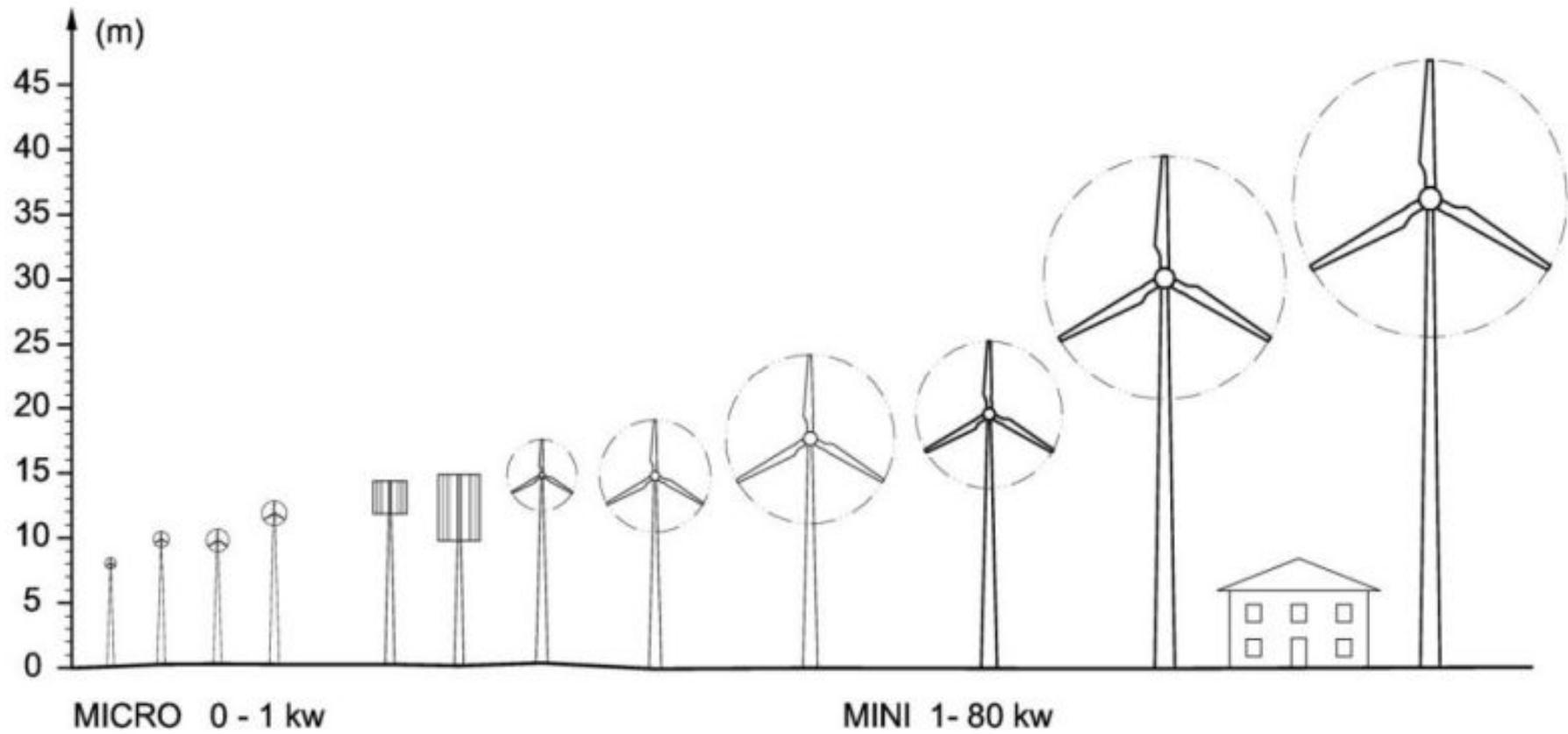
Campione: **modello GE4.1-113** (potenza di 4.1 MW e 113 metri di diametro del rotore)

5. PALE:

3 pale lunghe ognuna 56 metri: il diametro della superficie spazzata è di 113 metri.



POTENZE E DIMENSIONI DI TURBINE DI PICCOLA TAGLIA



TIPI DI TURBINE EOLICHE

Asse orizzontale

- Single to many blades - 2, 3 most efficient
- Upwind, downwind facing
- Solidity / Aspect Ratio – speed and torque
- Shrouded / Ducted – Diffuser Augmented Wind Turbine (DAWT)

Asse verticale

- Darrieus / Egg-Beater (lift force driven)
- Savonius (drag force driven)



Photos courtesy of Steve Connors, MITEI

TIPI DI ROTORI- ROTORE TRIPALA

Tre pale montate a 120° l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico di circa 30 rpm (giri al minuto)

Configurazione più usata.
Alti costi di trasporto ma...



Il ROTORE TRIPALA ha il miglior rapporto costi/potenza sviluppata

TIPI DI ROTORI- ROTORE BIPALA

Rotori bipala: con due pale montate a 180° l'una rispetto all'altra e con numero di giri caratteristico di circa 40 rpm.

Ha un costo minore dei tripala ma ha una efficienza minore

E' generalmente provvisto di **mozzo oscillante** che gli consente di equilibrare la spinta asimmetrica sul rotore.



ANALISI DI BETZ E LIMITE DI POTENZA

Ogni torre eolica “acquisisce” potenza dal vento che viene poi trasformata in energia meccanica.

La potenza del vento aumenta in maniera proporzionale al cubo della sua velocità.

Area spazzata f(raggio delle pale)

POTENZA TURBINA:

$$P_T = \frac{1}{2} * \rho * A * v^3 * C_p$$

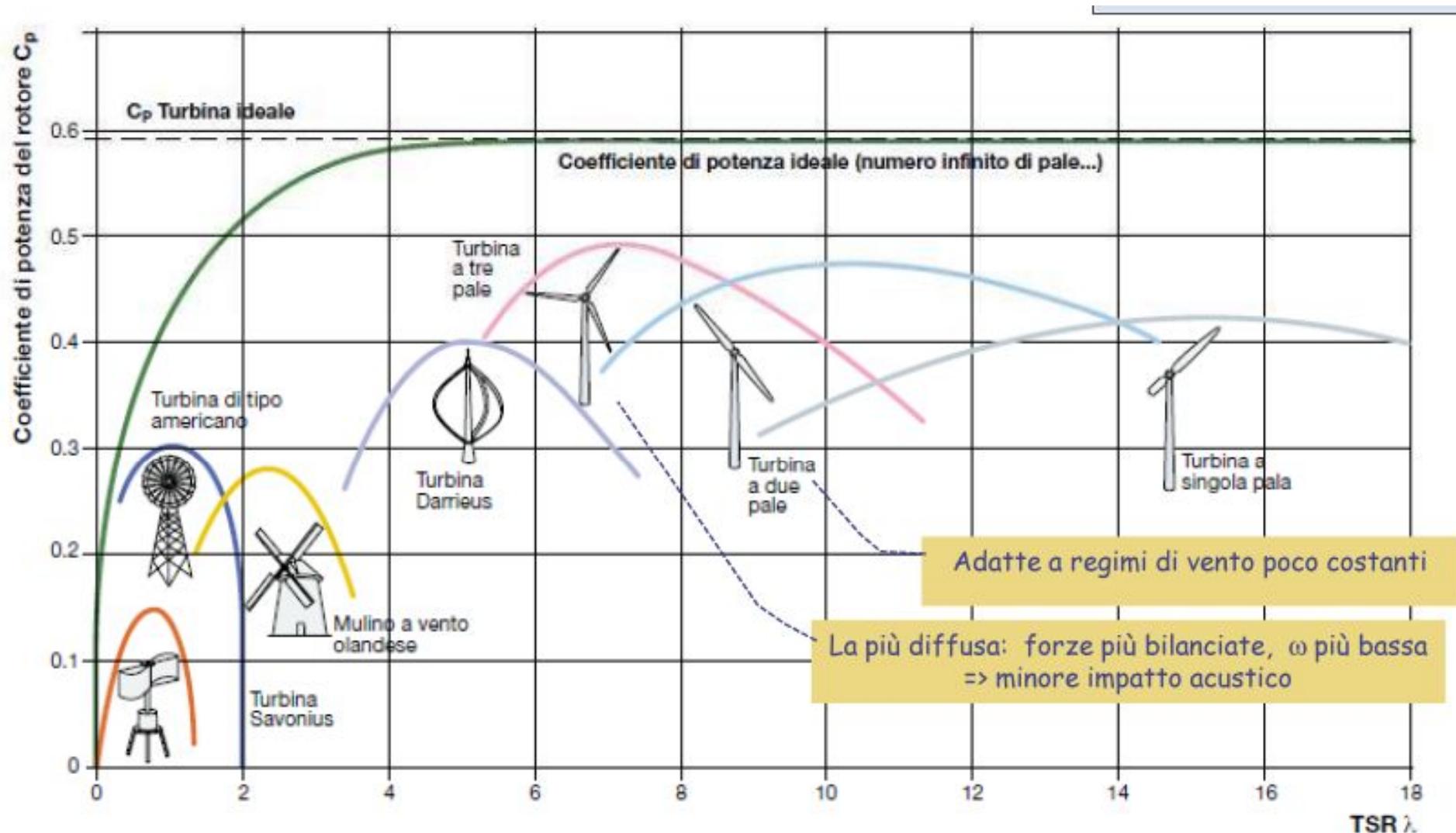
COEFFICIENTE DI POTENZA:

$$C_p = P_T/P_W$$

LIMITE DI BETZ: il massimo di potenza acquisibile dalla torre eolica

Il 59.3% di efficienza è il massimo che una turbina eolica convenzionale può raggiungere estraendo potenza dal vento.

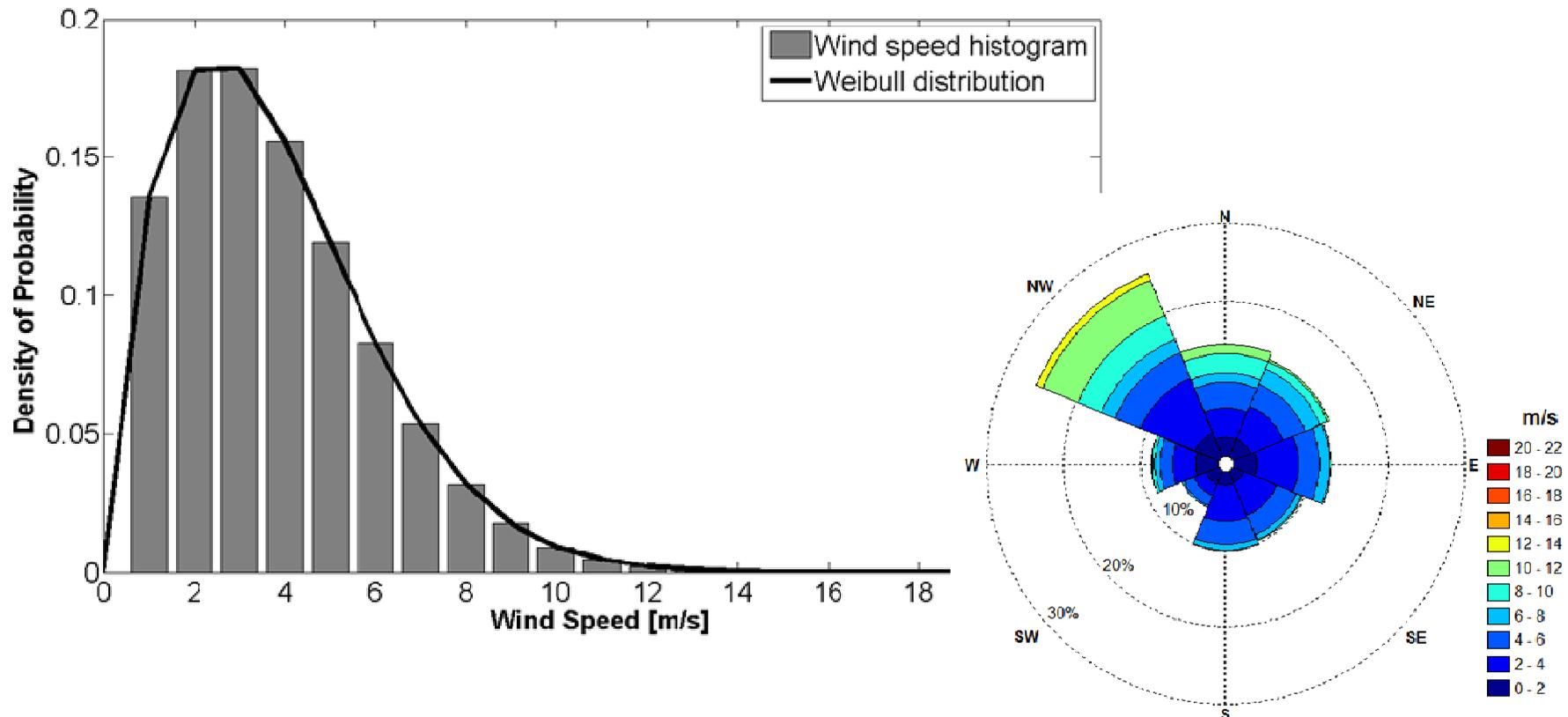
COEFFICIENTE DI POTENZA DEL ROTORE



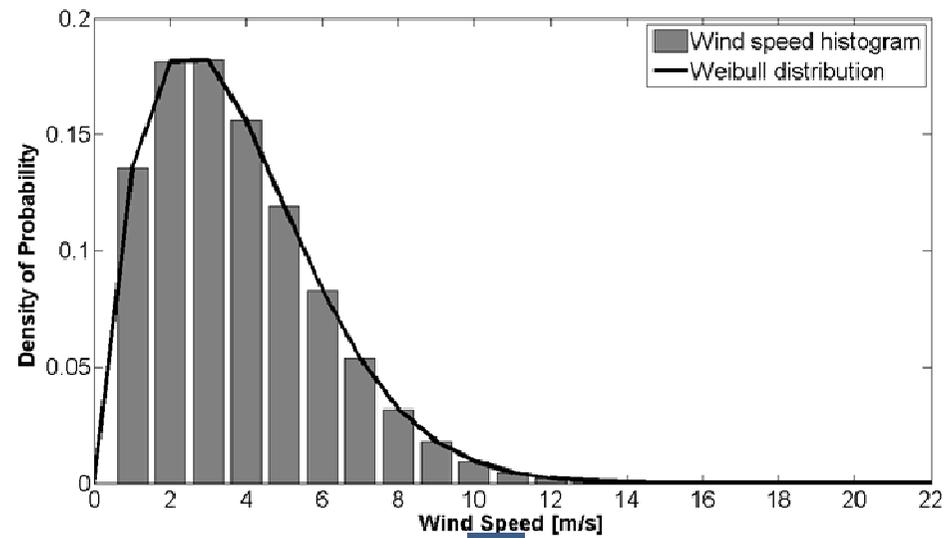
rapporto tra la max velocità periferica ($u = \omega \cdot r$, con ω velocità di rotazione e r raggio della pala), e la velocità del vento, v ($u/v = \lambda = \text{Tip Speed Ratio}$ ”, indicato anche come TSR)

PRODUZIONE ANNUA DI ENERGIA

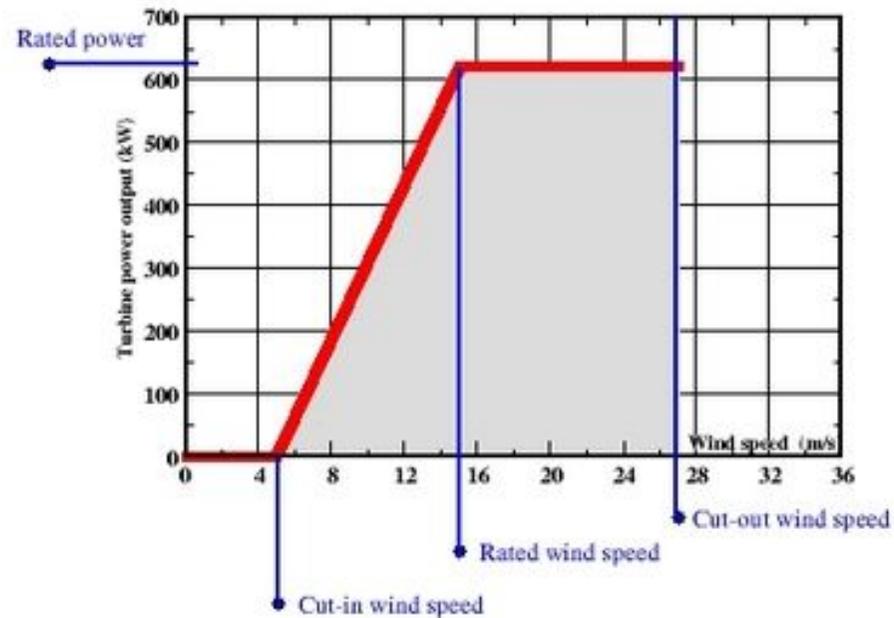
La valutazione della produzione annua di energia può essere effettuata semplicemente conoscendo la **distribuzione di frequenza della velocità del vento all'altezza del rotore** e la **curva di potenza della macchina**, la quale fornisce la potenza erogata dalla turbina in funzione della velocità del vento.



PRODUZIONE ANNUA DI ENERGIA



Idealized power curve for a wind turbine (example)



PROGETTO DELLE PALE

Le pale più utilizzate sono realizzate in fibra di vetro o alluminio ed hanno un profilo simile ad una ala di aereo.

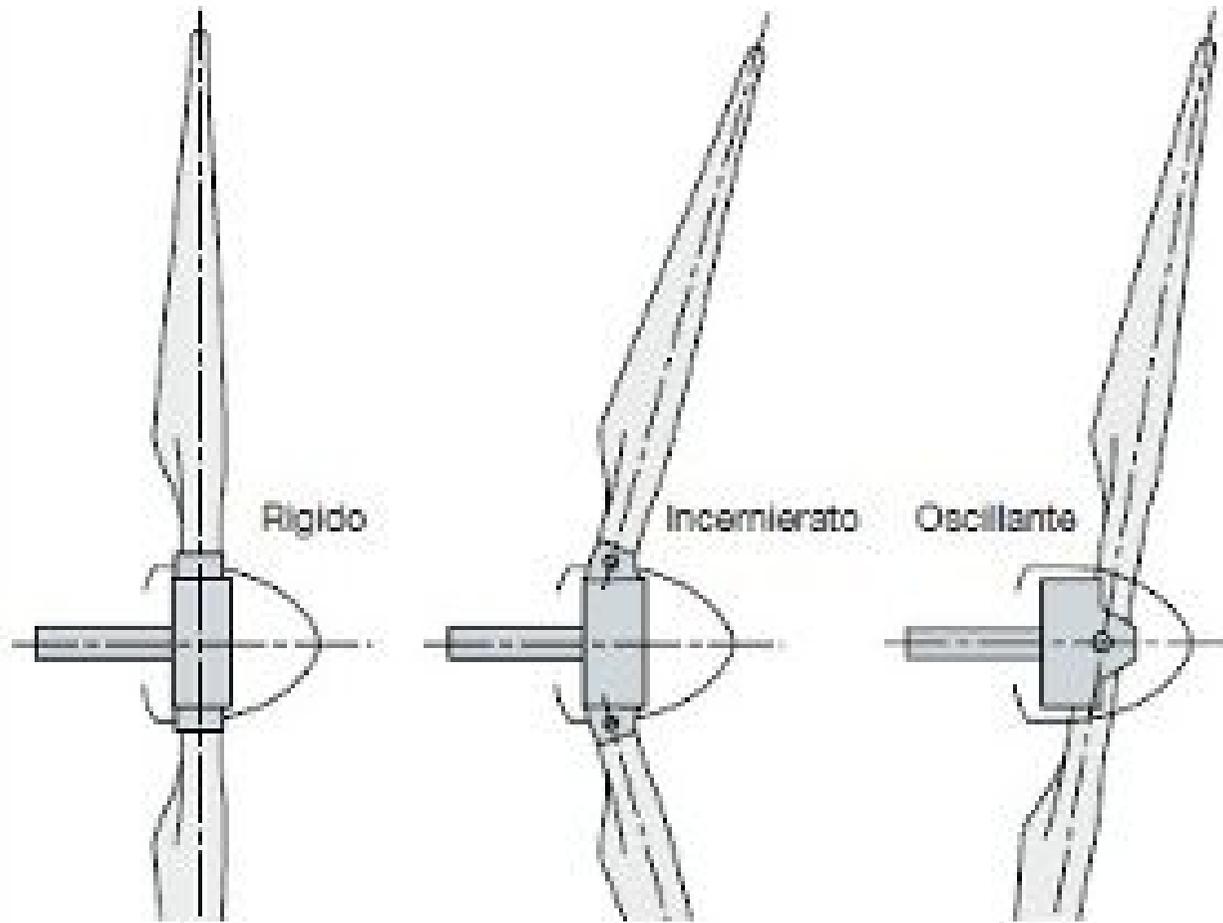
Viene chiamato “angolo di pitch”, o angolo di calettamento, l'**angolo che assume la pala rispetto al piano di rotazione del rotore.**

Variando l'angolo di pitch è possibile regolare l'**angolo di incidenza del vento sulla pala** e di conseguenza effettuare una regolazione attiva della macchina.

TIPI DI MOZZO

Tre tipi principali di mozzo:

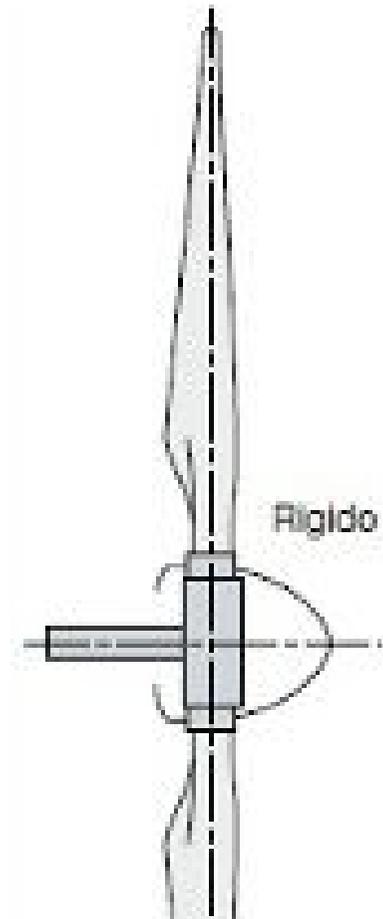
- rigido;
- oscillante (teetering);
- per pale incernierate.



TIPI DI MOZZO: MOZZO RIGIDO

Il mozzo rigido è progettato per mantenere le principali parti che lo costituiscono in posizione fissa rispetto all'albero principale. L'angolo di Pitch delle pale può comunque essere variato, ma non è consentito alcun altro movimento.

È di fatto il tipo più utilizzato nei rotor a tre o più pale. Il mozzo rigido deve possedere una robustezza tale da sopportare i carichi dinamici trasmessi dalle pale.



TIPI DI MOZZO: MOZZO OSCILLANTE

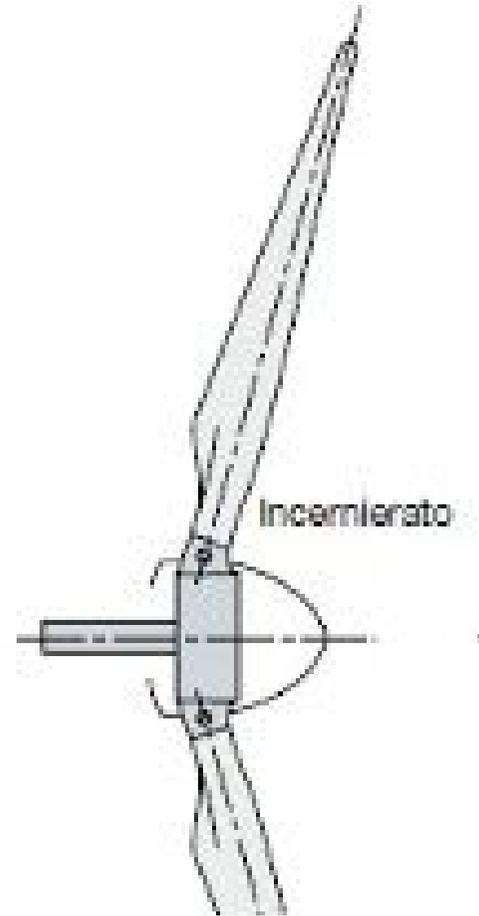
I mozzo oscillante è utilizzato **in quasi tutte le turbine a due pale**.

E' progettato per ridurre i carichi aerodinamici sbilanciati trasmessi all'albero tipici dei rotori bipala, consentendo al rotore di **oscillare di alcuni gradi** rispetto alla direzione perpendicolare all'asse di rotazione dell'albero principale. Il mozzo oscillante è stato principalmente abbinato a turbine con angolo di Pitch fisso, ma può anche essere utilizzato su turbine ad angolo variabile.

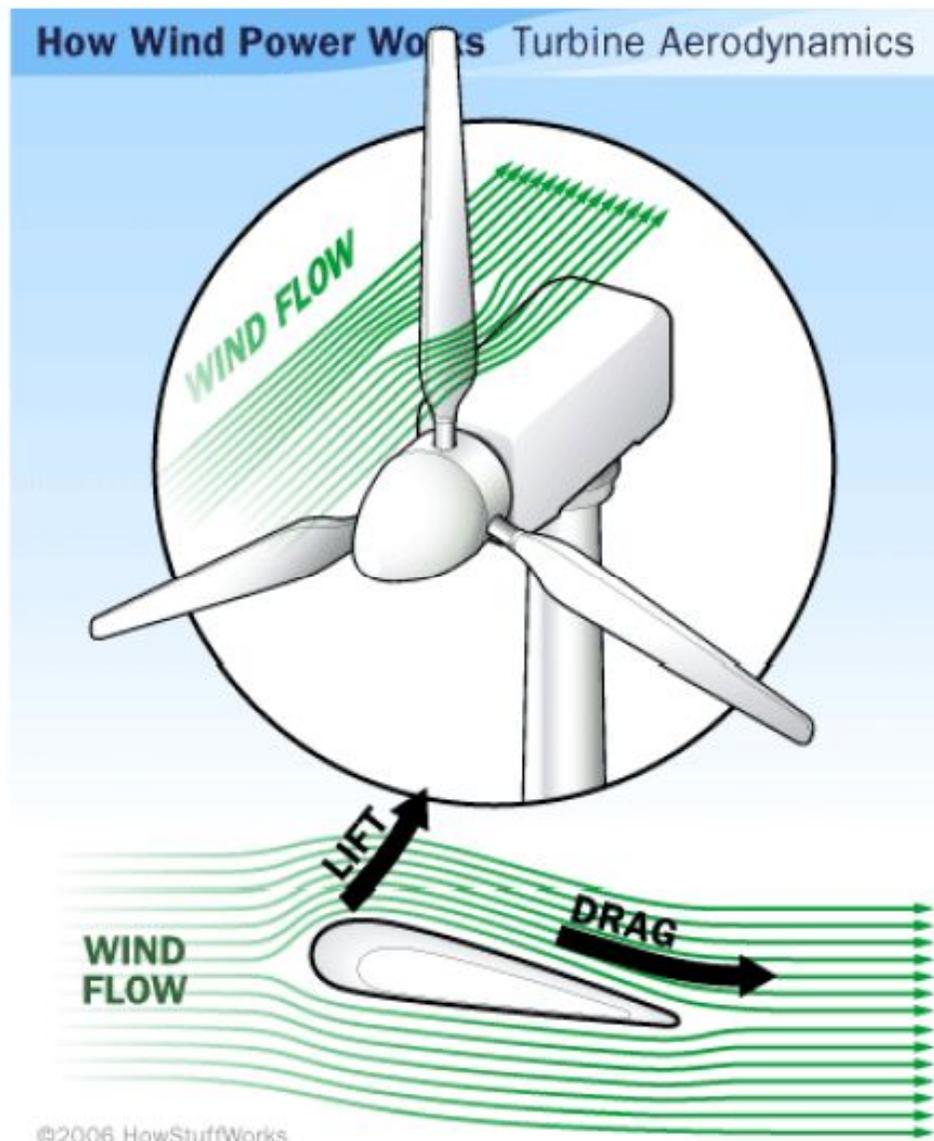
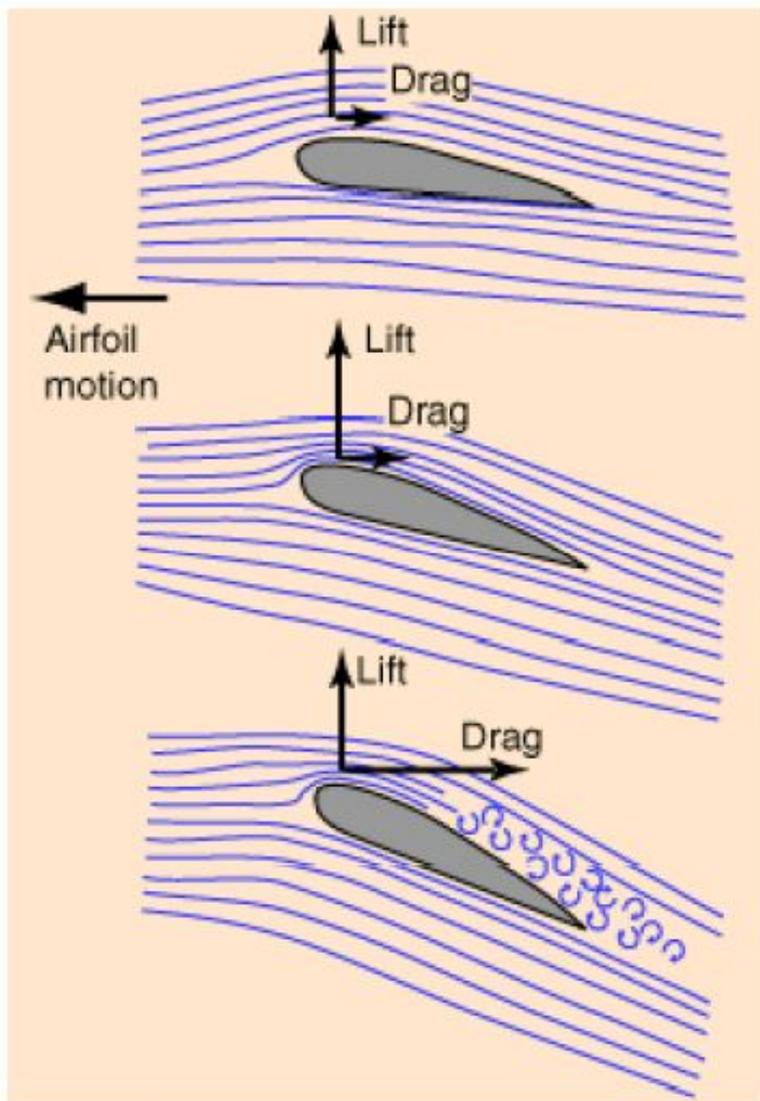


TIPI DI MOZZO: MOZZO INCERNIERATO

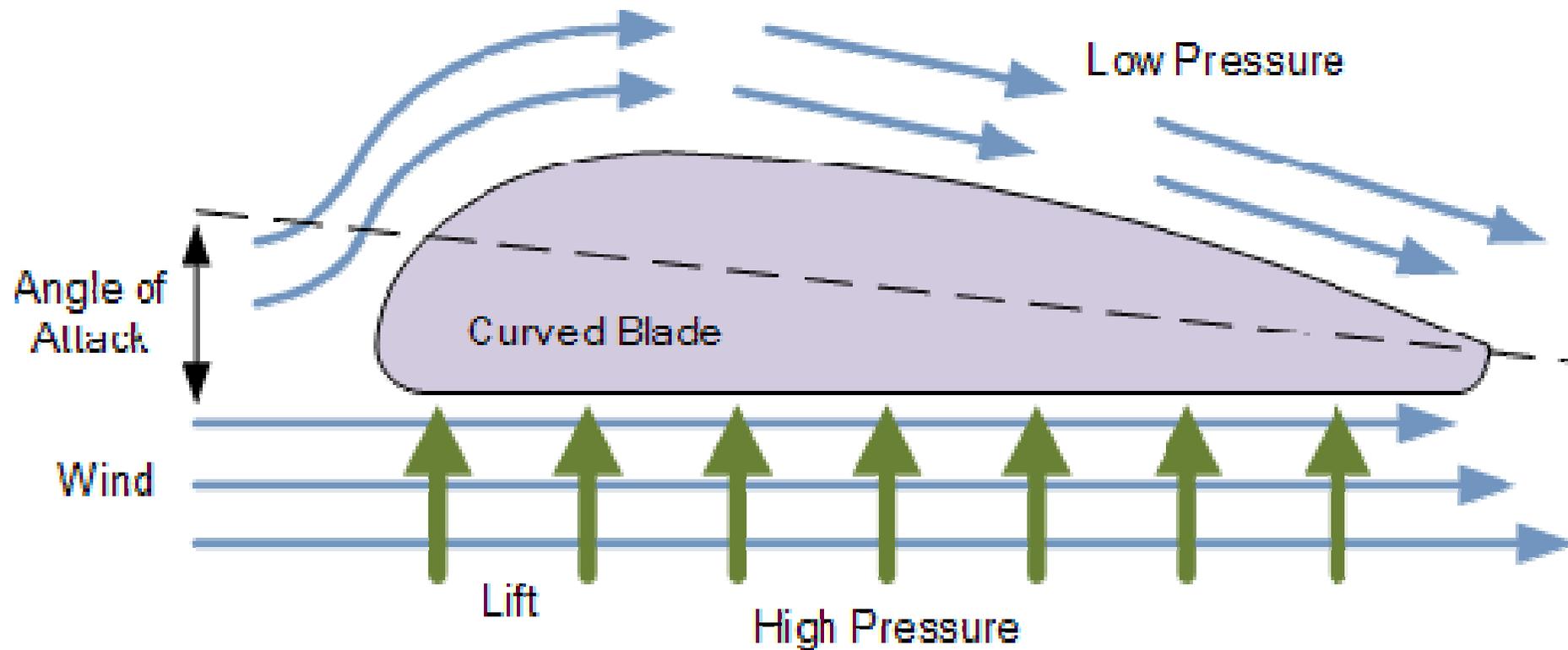
Il mozzo per pale incernierate è una via di mezzo tra i primi due modelli ed un **mozzo rigido con vincoli a cerniera** per le pale ed utilizzato dalle **turbine sottovento** per ridurre i carichi eccessivi durante i forti venti.



FLUSSO DI VENTO- PROGETTO DELLE PALE



FLUSSO DI VENTO- PROGETTO DELLE PALE



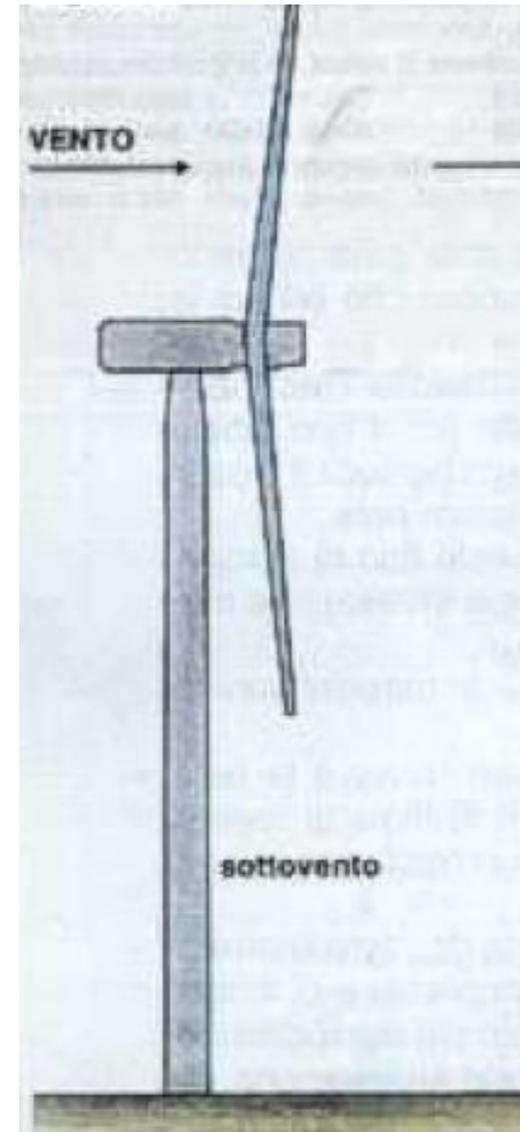
ROTORE SOTTO-VENTO

Il rotore sottovento ha i **vantaggi**:

- essere autoallineante rispetto al vento,
- avere pale più flessibili,
- più leggero,

Svantaggi:

- fortemente schermato dalla torre,
- genera carichi pulsanti su tutta la struttura,
- ha una efficienza minore



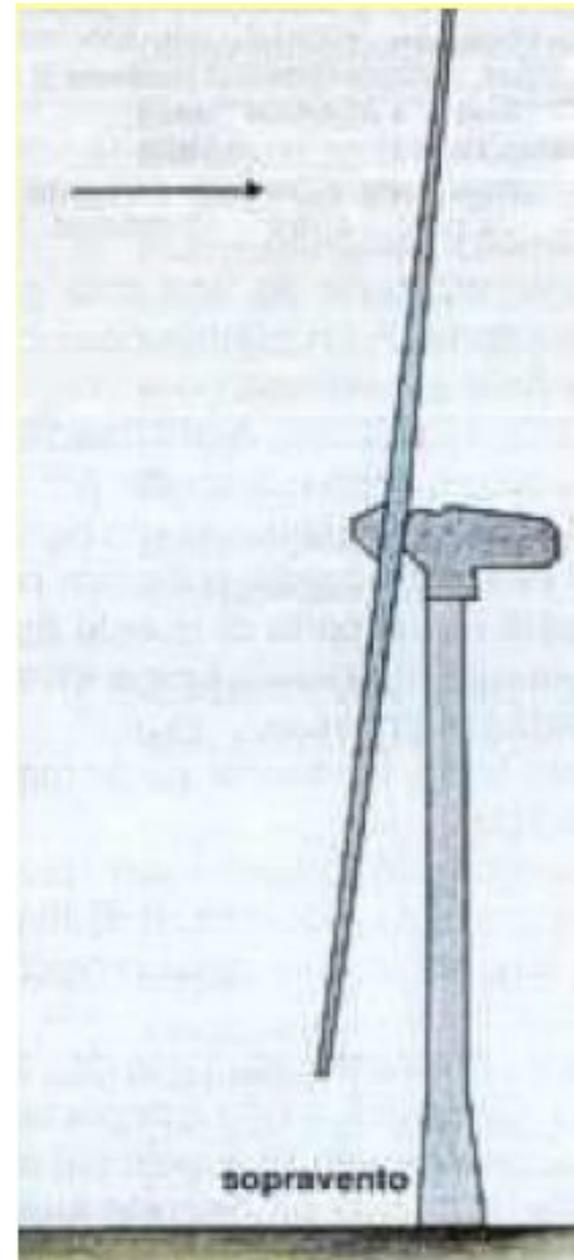
ROTORE SOPRA-VENTO

Il rotore sopravento ha il **vantaggio** di:

- essere più efficiente

Svantaggi:

- richiede pale più rigide ed una maggior distanza del rotore dalla torre



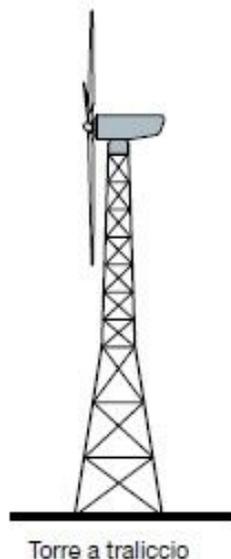
TORRI DI SOSTEGNO

Possono essere a **traliccio** simile a quelli utilizzati per il sostegno dei cavi degli elettrodotti. Questa soluzione ha lo svantaggio di essere strutturalmente molto rigida e di trasmettere quindi alle fondazioni tutti i carichi generati dalla navicella, particolarmente elevati in certe condizioni transitorie.



Oppure possono essere **a parete piena** (acciaio o materiali legati), di forma tubolare (molto elastiche)

La torre viene realizzata con elementi componibili di forma tronco-conica, collegati con flange o ad incastro.

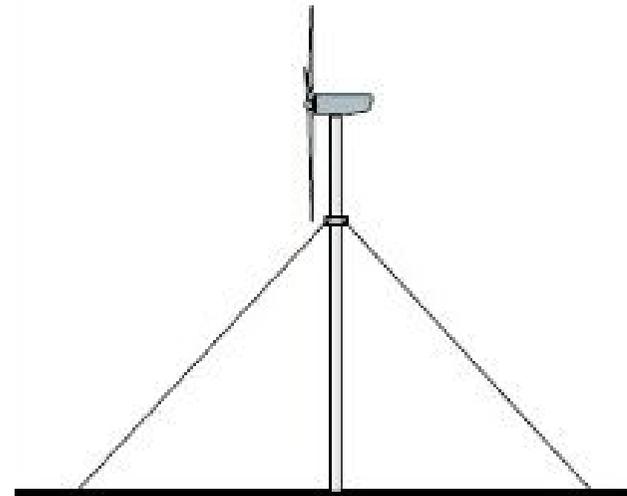


TORRI DI SOSTEGNO

Le turbine odierne sono per la maggior parte di tipo tubolare perché presentano diversi vantaggi rispetto a quelle a traliccio:

- non necessitano di numerose connessioni tramite bulloni che devono poi essere controllate periodicamente;
- forniscono un'area protetta per l'accesso alla turbina e la salita sulla navicella più sicura ed agevole tramite scala interna o ascensore nelle turbine più grandi
- sono esteticamente migliori rispetto ai tralicci.

Esiste un terzo tipo di torre, la **torre a tiranti**, poco utilizzata per gli impianti in media-grossa potenza mentre è particolarmente indicata per impianti minieolici.



TORRI DI SOSTEGNO

L'altezza della torre **dipende dal regime di vento del sito d'installazione.**

In genere **l'altezza della struttura di sostegno è superiore al diametro della turbina**, ma il rapporto torre/diametro decresce fortemente al crescere del diametro.

Le torri tubolari sono usualmente costruite in acciaio laminato, anche se alcune sono in cemento; hanno forma conica.

Le diverse sezioni sono collegate e vincolate tra loro da flange imbullonate. Tali tipi di torri creano una notevole scia sottovento ed è per questo che nella maggior parte delle turbine il rotore è posto sopravvento.

Inoltre sono strutture molto visibili e pertanto non devono mostrare segni di corrosione per diversi anni: a tal fine deve essere scelto un rivestimento adeguato.

Le torri sono infisse nel terreno mediante **fondazioni costituite in genere da plinti di cemento armato** collocati ad una certa profondità.

TORRI DI SOSTEGNO



TORRI DI SOSTEGNO IN CALCESTRUZZO

Uso di torri in calcestruzzo (in fase di ricerca) potrebbe offrire una consistente serie di vantaggi quali:

- una maggiore durata in termini di vita, precisamente 20 anni di più rispetto a quella garantita alle installazioni attuali
- una maggiore facilità di trasporto dei pezzi
- il ricorso al più conveniente mercato dell'industria dei prefabbricati in calcestruzzo
- la riduzione delle importazioni di acciaio
- la riduzione dei costi
- la possibilità del raggiungimento di altezze a 100 metri che favorirebbero condizioni di vento più stabili e un aumento produttivo del 15%

DISPOSIZIONE DELLE TORRI -CRITERI

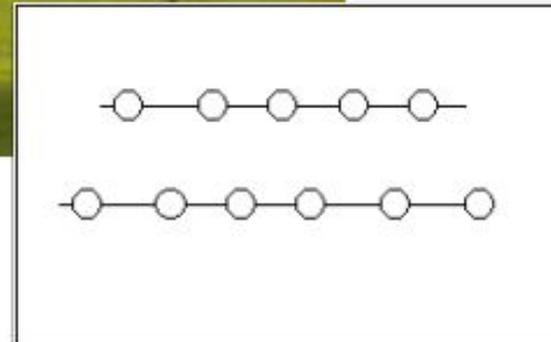
Superficie del terreno possibilmente **priva di elementi che possano ostacolare il flusso** del vento (alberi, case, ostruzioni, etc), in quanto in presenza di questi elementi bisognerebbe incrementare notevolmente l'altezza della torre per evitare tale interferenza.

E' importante verificare che **non vi sia interferenza fra i vari aerogeneratori** che lo compongono. Generalmente, la distanza reciproca fra due aerogeneratori perché questo accada è circa 5-10 volte il diametro dell'aerogeneratore.

La disposizione più comune degli aerogeneratori è quella lineare, ma sono anche presenti quelle planari o lineare a tratti raccordati

DISPOSIZIONE

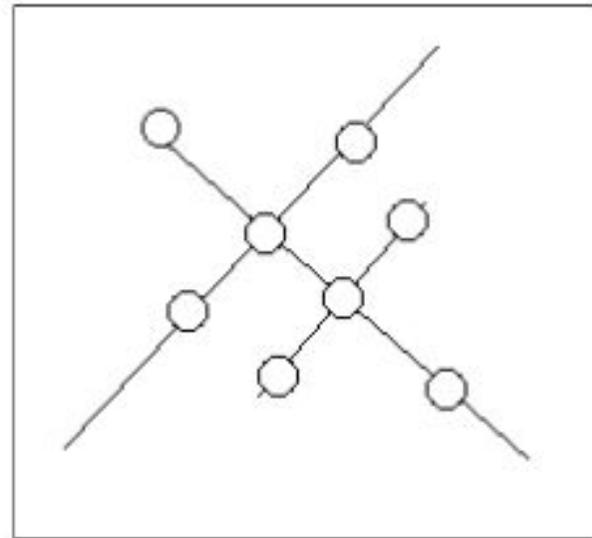
Disposizione in linea



DISPOSIZIONE PLANARE

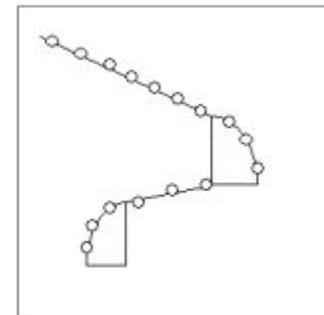


Disposizione planare



DISPOSIZIONE

Disposizione con linea portante a tratti raccordati



DISPOSIZIONE

Disposizione su alture



DISPOSIZIONE



Impianto off-shore di Hornsrev (Jutland, Danimarca):
80 turbine da 2 MW ciascuna, produzione di 600 GWh/anno
(velocità media ≈ 10 m/s, $H_{eq} \approx 3.750$ h/anno)

DISPOSIZIONE

Effetto Selva

