



PROGETTO PER LA COSTRUZIONE E L'ESERCIZIO DI UN
IMPIANTO EOLICO DELLA POTENZA DI 61.2 MW
DENOMINATO "LACCANU" DA REALIZZARSI NEI
COMUNI DI BESSUDE, ITTIRI, THIESI E BANARI (SS) CON
LE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ELETTRICHE

ANALISI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

Rev. 0.0

Data: 10 novembre 2023

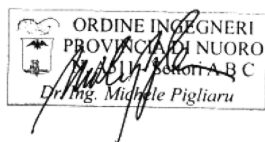
QQR-WND-026. REL044

Committente:

Queequeg Renewables Due S.r.l.
piazza Cinque Giornate, 10
20129 Milano (MI)
C. F. e P. IVA: 04578310163
PEC: queequegrenewablesdue@pec.it

Progetto e sviluppo:

Queequeg Renewables, ltd
2nd Floor, the Works,
14 Turnham Green Terrace Mews,
W41QU London (UK)
Company number: 11780524
email: mail@quren.co.uk



SOMMARIO

1	Dati Generali e Anagrafica.....	3
2	Premessa.....	4
3	Dati di progetto e della componentistica.....	7
3.1	Calcolo della massima gittata.....	7
3.2	Calcolo della velocità periferica	8
3.3	Simulazione delle condizioni di lancio.....	9
4	Conclusioni.....	11

1 Dati Generali e Anagrafica

Ubicazione Impianto

Nome Impianto	"Laccanu"
Comune	Bessude, Ittiri, Thiesi e Banari
CAP	
Coordinate (EPSG 7791)	40.56040N 8.62820E

Catasto Terreni

Comune A827 Fogli

Proponente

Ragione Sociale	Queequeg Renewables Due S.r.l.
Indirizzo	Piazza Cinque Giornate, 10 20129 Milano (MI)
C.F. e P.IVA	04578310163
PEC	queequegrenewablesdue@pec.it

Staff e professionisti coinvolti

Progetto a cura di	Queequeg Renewables ltd
--------------------	-------------------------

2 Premessa

Il settore energetico ha un ruolo cardinale nello sviluppo dell'economia, sia come fattore abilitante (fornire energia a costi competitivi, con limitato impatto ambientale e con elevata qualità del servizio è una condizione essenziale per lo sviluppo delle imprese e per le famiglie), sia come fattore di crescita di per sé (si pensi al grande potenziale economico della cosiddetta *Green economy*). Come riconosciuto nelle più recenti strategie energetiche europee e nazionali, assicurare un'energia più competitiva e sostenibile è uno degli obiettivi di maggiore interesse per il futuro.

IEA (International Energy Agency) stima che per il 2023 un totale di oltre 1.7 miliardi di dollari verranno investiti in tecnologie a bassa emissione di CO₂. Questo importo rappresenta oltre il 60% degli investimenti totali stimati in energia, con un aumento anno su anno di oltre il 55%.

La produzione energetica da fonte eolica ha vissuto negli ultimi anni un incremento massiccio nella efficienza, con conseguente abbassamento del costo dell'energia prodotto che si riversa su un prezzo all'utente finale (commerciale o privato) più competitivo. L'eolico onshore rappresenta attualmente una delle fonti di produzione di energia più efficienti ed economiche disponibili.

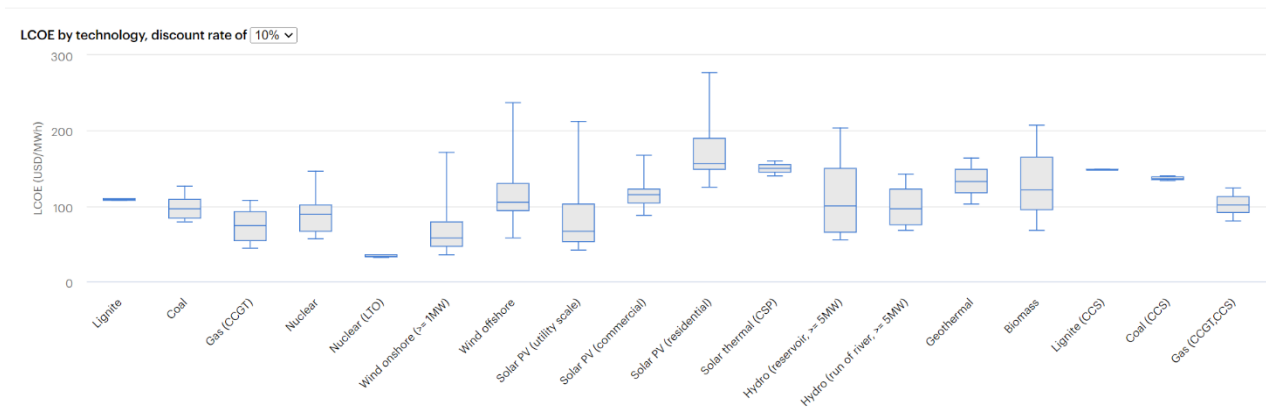


Figura 1 — Costo del MWh per fonte di energia (fonte: IEA)

Ciò è il risultato dei progressivi miglioramenti nella tecnologia, scaturiti da importanti investimenti in ricerca applicata, e dalla diffusione globale degli impianti (economie di scala), alimentata dalle politiche di incentivazione adottate dai governi a livello mondiale. Lo scenario attuale, contraddistinto dalla riduzione degli incentivi, ha contribuito ad accelerare il progressivo annullamento del differenziale di costo tra la generazione elettrica convenzionale e la generazione FER.

In questo contesto, la misura dell'efficienza di prodotto di impianti come quello proposto ma più in generale delle stazioni di generazione elettrica, sono misurati da un parametro chiamati LCOE (*"Levelized Cost of Energy"* o *"Costo Livellato dell'Elettricità"*) che indica in sintesi il costo netto di produzione di una unità di energia prodotta durante il periodo di vita utile del generatore.

In questo contesto, la società proponente, controllata dal gruppo Queequeg Renewables, rappresenta un player su scala internazionale nel settore delle FER, detenendo al momento oltre 10 GW di asset rinnovabili in vari stadi di sviluppo in Italia e in Europa.

In tale direzione si inquadra il presente progetto di un impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica che Queequeg Renewables Due S.r.l., società controllata interamente dalla capofila, ha in programma di realizzare nei comuni di Bessude, Thiesi, Ittiri e Banari, Regione Sardegna, Città Metropolitana di Sassari.

In considerazione del rapido evolversi della tecnologia, che oggi mette a disposizione aerogeneratori di provata efficienza, con potenze di circa un ordine di grandezza superiori rispetto a quelle disponibili solo vent'anni or sono, il progetto proposto prevede l'installazione e la messa in esercizio di 9 turbine della potenza nominale di 6.8 MW ciascuna, posizionate su torri di sostegno metalliche dell'altezza indicativa di 134 m, nonché l'approntamento delle opere accessorie indispensabili per il funzionamento e la gestione degli aerogeneratori (viabilità, piazzole, distribuzione elettrica di impianto, cavidotto di connessione alla RTN e opere accessorie necessarie al funzionamento dell'impianto stesso). Gli aerogeneratori in progetto saranno dislocati tra quote altimetriche indicativamente comprese nell'intervallo tra i 490 e i 640 m s.l.m, permettendo ai generatori di accedere a un flusso ventoso scevro dalla maggior parte delle turbolenze quali quelle generate da edifici, orografia montuosa o altre strutture geomorfologiche.

La potenza complessiva del parco eolico sarà di 61.2 MW, con una potenza elettrica in immissione di 61.2 MWac come stabilito dal preventivo di connessione rilasciato dal Gestore della Rete di Trasmissione Nazionale (Terna) con codice pratica 20220091547 del 19/10/2022, e accettato dalla società in data 06/02/2023.

Le opere di connessione da realizzare riguardano esclusivamente il comune di Ittiri, in cui è ipotizzata la connessione elettrica a 36kV dell'impianto alla RTN presso la sezione a 36kV della attuale SE RTN di Terna a 380kV da inserire in entra – esce alla linea 380kV.

Nello scenario progettuale prospettato, l'elettrodotto in antenna a 36 kV per il collegamento della centrale alla citata stazione RTN costituisce impianto di utenza per la connessione, mentre lo stallo arrivo produttore a 36 kV nella medesima stazione costituisce impianto di rete per la connessione.

In coerenza con la normativa nazionale e regionale applicabile, la procedura autorizzativa dell'impianto si articola attraverso le seguenti fasi:

- istanza di Valutazione di Impatto Ambientale ai sensi dell'art. 23 del D.Lgs. 152/2006 (Testo Unico Ambientale) al Ministero dell'Ambiente e della Sicurezza Energetica (MASE) ed al Ministero della Cultura (MiC), in quanto intervento di cui alla tipologia progettuale di cui al punto 2 dell'Allegato 2 parte seconda del TUA *"impianti eolici per la produzione di energia elettrica sulla terraferma con potenza complessiva superiore a 30 MW"*, oltre alle successive modifiche e integrazioni di legge.
- istanza di Autorizzazione Unica ai sensi dell'art.12 DLgs 387/2003, del D.M. 10/09/2010 e della D.G.R. 3/25 del 23.01.2018 alla Regione Sardegna – Servizio Energia ed Economia Verde, trattandosi di un impianto di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili di potenza pari a 61.2 MW.

Le interdistanze tra le turbine, dovute dalle accresciute dimensioni degli aerogeneratori scelti per lo sviluppo del progetto proposto, contribuiscono ad affievolire i principali impatti o disturbi ambientali caratteristici della tecnologia, quali l'eccessivo accentramento di turbine in aree ristrette (in particolare il disordine visivo determinato dal cosiddetto "effetto selva"), le probabilità di collisione con l'avifauna e la chiroterofauna, attenuate dalla ridotta velocità di rotazione dei gruppi rotore, la pressione acustica e l'ombreggiamento intermittente (*shadow flickering*).

La presente costituisce la relazione tecnico-illustrativa generale del progetto definitivo delle opere di realizzazione indispensabili per assicurare il processo costruttivo e l'ottimale esercizio della centrale (viabilità di servizio, piazzole, opere di regimazione dei deflussi e ripristini). La descrizione delle opere elettromeccaniche è riportata nello specifico progetto delle infrastrutture elettriche e qui solo introdotta per praticità.

3 Dati di progetto e della componentistica

3.1 Calcolo della massima gittata

Per una valutazione puntuale e comprensiva degli effetti in caso di rottura di un organo rotante, si considerano le concomitanze di tutte le condizioni peggiorative al contorno, così da simulare il *worst case scenario*. Si è pertanto ipotizzato uno studio del moto di un proiettile con una velocità massima pari al numero massimo di giri al minuto verificati secondo l'aerogeneratore utilizzato indicativamente a progetto, ossia il V172-Eventus.

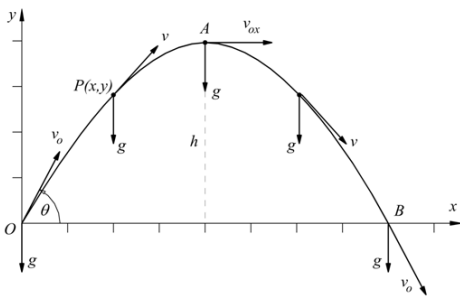


Figura 2 - Rappresentazione del moto di un proiettile

La resistenza dell'aria è un elemento fondamentale per l'attrito fornito dal fluido al proiettile (che nel nostro caso è rappresentato dalla pala dell'aerogeneratore), che è per definizione dipendente dalla forma e dalla velocità del corpo che viaggia nel fluido. Tuttavia, per amor di semplicità, nella prima parte di questa analisi la trascureremo.

L'organo rotante, ovvero la pala, subisce l'azione costante dell'accelerazione di gravità, mentre l'inerzia dovuta all'energia cinetica iniziale del corpo è esemplificata dall'angolo *theta* rispetto al piano orizzontale. Se ne desume che lungo l'asse delle x il corpo osserverà un corpo rettilineo uniforme, mentre lungo l'asse y il corpo seguirà un moto uniformemente accelerato.

Pertanto la componente orizzontale della velocità sarà pari a:

$$v_x = v_{x(0)}$$

Il moto lungo l'asse verticale sarà invece disciplinato da:

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{y(0)} t + y_0$$

La gittata massima ottenibile da un corpo sull'asse orizzontale prima di toccare terra, sarà ottenuta quando il valore lungo l'asse y è uguale a zero, e pertanto:

$$-\frac{1}{2} g t^2 + v_{y(0)} t + y_0 = 0$$

Le due soluzioni di questa equazione, quando l'altezza di partenza $y_0 = 0$, sono:

$$t_0 = 0$$

$$t_1 = \frac{-2v_{y0}}{g} = \frac{-2(v_0 \sin \theta)}{g}$$

dove t_0 è il momento del distacco del proiettile, mentre t_1 è il momento di impatto al suolo (ipotizzato alla medesima quota del lancio) del corpo. Pertanto, considerando un valore $x_0 = 0$, si può riscrivere l'equazione come:

$$x = -(v_0^2/g) \sin 2\theta$$

Si deduce pertanto che la massima gittata sarà proporzionale all'intensità della velocità iniziale dell'organo rotante e all'angolo θ , per questo verrà in seguito effettuato uno studio che analizza la gittata al variare di θ tra 0 e 90.

3.2 Calcolo della velocità periferica

Posta la velocità di rotazione del rotore pari ad ω , e posto n il numero di giri compiuti dallo stesso nel minuto, avremo quindi una velocità rotazionale espressa in radianti al secondo pari a:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,27 \text{ rad/s}$$

e una velocità lineare del punto estremo v_e del rotore (con n pari a 12.1 giri/minuto, ossia la velocità massima prevista per l'aerogeneratore a progetto), e considerando il raggio dell'aerogeneratore (84.35 m) pari a:

$$v_e = \omega r = 106,9 \text{ m/s}$$

Considerando che il baricentro della pala è situato a circa 1/3 della lunghezza del longherone, possiamo pertanto dire che la velocità massima iniziale della pala in caso di rottura sarà pertanto:

$$v_b = \omega r = 35,6 \text{ m/s}$$

3.3 Simulazione delle condizioni di lancio

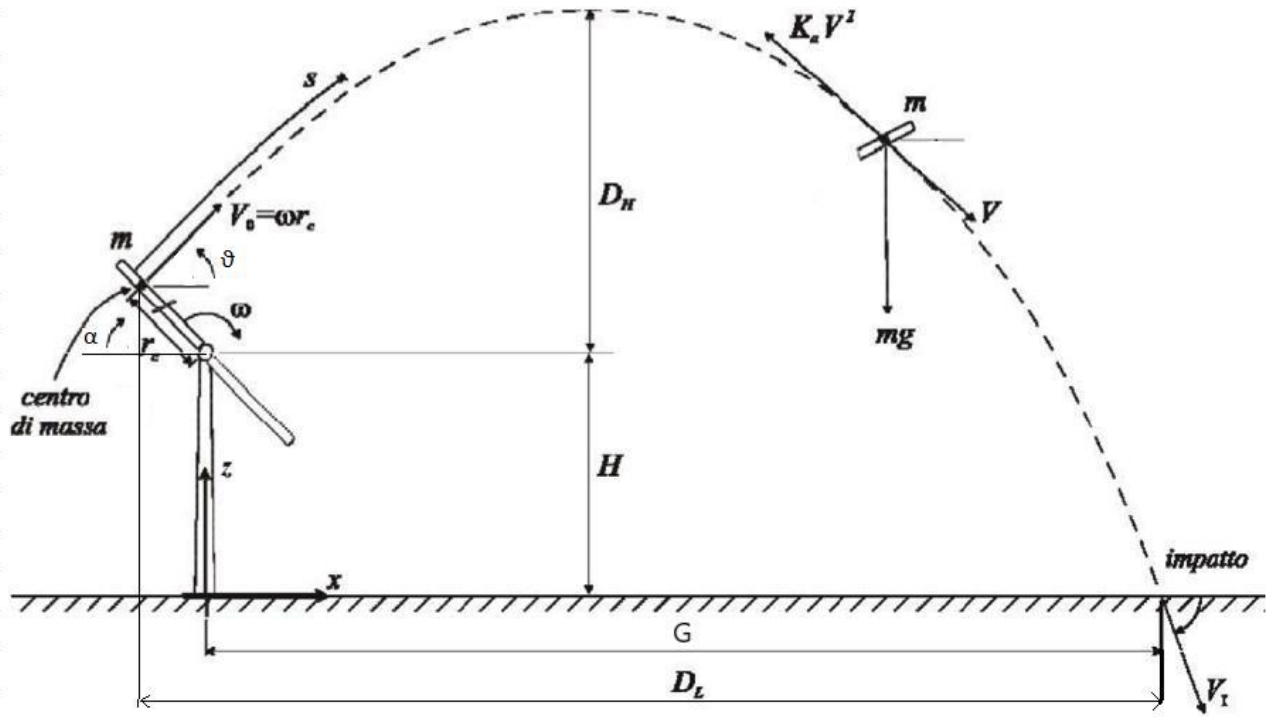


Figura 3 - Schema geometrico del fenomeno di distacco della pala di un aerogeneratore

Scomponendo il moto della pala sugli assi orizzontale (x) e verticale (y), abbiamo sulla prima un moto uniforme, e sulla seconda un moto rettilineo uniformemente accelerato dalla gravità:

$$v_{xb} = \sin \theta * v_b$$

$$v_{yb} = \cos \theta * v_b$$

La gittata massima si otterrà con un alzo della traiettoria pari a $\alpha = 65^\circ$ o $\theta = 25^\circ$ dal piano campagna, ottenendo pertanto un tempo di caduta che si può ricavare dalla seguente formula:

$$y = -\frac{1}{2} g t^2 + v_{yb} t + y_0$$

Dove y_0 è il punto di quota al momento del distacco, e cioè $134 \text{ m} + (28,12 * \cos 65^\circ) \text{ m}$, ossia **159,4 metri**. In definitiva quindi l'equazione si risolve in un tempo di caduta a terra di **7,43 s**.

Sostituendo il dato di cui sopra nell'equazione di moto uniforme lungo l'asse x del piano campagna, otteniamo la gittata del baricentro G_b , misurata da base torre pari a:

$$G_b = v_{xb}t + x_0 = 30,85 \text{ m/s} * 7,80 \text{ s} - 14,06 \text{ m} = \mathbf{228,34 \text{ m}}$$

dove x_0 è la distanza alla quale avviene il distacco, negativa rispetto al sistema di riferimento considerato.

A questa andremo a sommare la massima lunghezza della pala oltre al baricentro, ossia $84.35 \text{ m} * 2/3$, per ottenere infine una gittata totale del corpo pala di **284,57 metri**.

Di seguito si riporta l'analisi effettuata al variare dell'angolo α da 0 a 90 gradi, tramite la quale si è giunti alla conclusione che l'angolo di 65 genera la gittata maggiore.

Tabella 1 - Dati per tempo di volo e gittata

Angolo α (°)	Altezza mozzo (m)	Velocità angolare ω (rad/s)	Raggio rotore (m)	Raggio baricentro (m)	Velocità baricentro v_b (m/s)	Velocità x baricentro v_{xb} (m/s)	Velocità y baricentro v_{yb} (m/s)	Altezza distacco y_0 (m)	Tempo di volo (s)	Gittata (m)	Gittata finale (m)
0	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	0	35.6269	134	9.9963	28.1167	84.3497
5	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	3.1050	35.4913	136.4505	10.0138	3.0840	59.3170
10	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	6.1865	35.0856	138.8824	9.9879	34.1011	90.3341
15	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	9.2209	34.4129	141.2771	9.9195	64.3085	120.5415
20	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	12.1851	33.4783	143.6165	9.8100	93.1151	149.3481
25	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	15.0565	32.2889	145.8826	9.6613	119.9835	176.2165
30	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	17.8134	30.8538	148.0583	9.4758	144.4465	200.6795
35	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	20.4347	29.1838	150.1271	9.2564	166.1201	222.3531
40	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	22.9005	27.2918	152.073	9.0065	184.7139	240.9469
45	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	25.1920	25.192	153.8815	8.7297	200.0379	256.2709
50	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	27.2917	22.9005	155.5386	8.4303	212.0042	268.2372
55	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	29.1838	20.4347	157.0318	8.1125	220.6256	276.8586
60	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	30.8537	17.8134	158.3497	7.7808	226.0086	282.2416
65	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	32.2889	15.0566	159.4824	7.4399	228.3435	284.5765
70	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	33.4783	12.1851	160.421	7.0943	227.8897	284.1227
75	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	34.4129	9.2209	161.1586	6.7485	224.9592	281.1922
80	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	35.0856	6.1865	161.6895	6.4066	219.8977	276.1307
85	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	35.4913	3.1051	162.0097	6.0724	213.0655	269.2985
90	134	1.2671	84.35	28.1167	35.6269	35.6268	0	162.1167	5.7490	204.8199	261.0529

4 Conclusioni

Scegliendo pertanto di modellizzare un distacco della pala con le seguenti ipotesi:

- Moto rigido non vincolato, e pertanto conservativa;
- Assenza di resistenza del fluido, e pertanto conservativa;
- Assenza di portanza;
- Urto sul terreno completamente anelastico;
- Quota di partenza del proiettile pari alla quota del mozzo dell'aerogeneratore (134 metri);
- Baricentro della pala pari a un terzo del corpo rigido a partire dalla radice di allaccio al rotore.