



REGIONE  
SICILIANA



COMUNE DI  
ENNA



COMUNE DI  
PIETRAPERZIA

**REGIONE SICILIA**  
PROVINCIA DI ENNA  
COMUNI DI ENNA E PIETRAPERZIA

**PROGETTO:**

*Impianto Eolico e delle relative opere di connessione denominato  
"ENNA"*

Progetto Definitivo

**PROPONENTE:**



DEDRA s.r.l.  
Via Umberto Giordano, 152 - 90144  
Palermo (PA)  
P.IVA 07146270827

**ELABORATO:**

ANALISI DEGLI EFFETTI DELLA ROTTURA DEGLI ORGANI ROTANTI

**PROGETTISTA:**

BLC s.r.l.

Ing. Eugenio Bordonali

Ing. Gabriella Lo Cascio



**Scala:**

**Tavola:**

ROR

**Data:**

29 Dicembre 2023

Rev.	Data	Descrizione
00	29/12/2023	prima emissione

## SOMMARIO

1.	PREMESSA.....	3
2.	INQUADRAMENTO DEL PROGETTO.....	4
3.	INTRODUZIONE ALLA TEMATICA.....	7
3.1.	DISTACCO DELLA PALA.....	8
3.2.	ROTTURA DELL'ESTREMITÀ DI PALA .....	8
3.3.	CONSIDERAZIONI SUL MOTO DI UN ELEMENTO ROTANTE .....	9
4.	MODELLO E IPOTESI DI CALCOLO .....	9
5.	CALCOLO DELLA GITTATA.....	11
6.	RISULTATI DELL'ANALISI PER WTG PARCO EOLICO ENNA.....	13
6.1.	DISTACCO DELLA PALA.....	13
7.	CONCLUSIONI .....	15

## 1. PREMESSA

Il presente documento costituisce la Analisi degli effetti della rottura degli organi rotanti relativa alla realizzazione dell'impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato "ENNA" di potenza 72 MW (di seguito il "Progetto" o "l'Impianto"), nel Comune di ENNA (EN), e relative opere di connessione, nel Comune di Pietrapersia (EN), che intende realizzare la società DEDRA s.r.l. (di seguito il "proponente").

Il Progetto prevede l'installazione di 18 aerogeneratori eolici tripala, di potenza nominale pari a 4 MW ciascuno (per un totale installato di 72 MW). Si prevede di impiegare aerogeneratori con diametro rotore fino a 166m e altezza al mozzo fino a 117m per una altezza massima fuori terra di 200m (si procederà alla scelta definitiva della macchina in base alle disponibilità del mercato al momento della realizzazione).

Gli aerogeneratori verranno collegati tra loro tramite cavi in MT a 36 kV che trasporteranno l'energia prodotta presso il punto di connessione alla rete elettrica.

Conformemente a quanto indicato nella soluzione tecnica minima generale di connessione comunicata dalla società TERNA S.p.a. in data 18/11/2022 C.P. 202202507 la connessione del presente impianto avverrà in antenna a 36 kV con una nuova stazione elettrica (SE) di trasformazione 150/36 kV della RTN, da inserire in entra - esce sulle linee RTN a 150 kV "Terrapelata - Barrafranca" e "Caltanissetta CP – Butera SE".

L'iniziativa rientra nell'impegno della società a contribuire al soddisfacimento delle esigenze d'energia pulita e sviluppo sostenibile sancite sin dal Protocollo Internazionale di Kyoto del 1997, ribadite nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza e nel Piano nazionale integrato per l'energia e il clima per gli anni 2021-2030.

Nell'ambito della progettazione di un impianto di produzione energia da fonte eolica, uno dei molteplici aspetti che viene preso in considerazione è la valutazione degli effetti sull'ambiente circostante derivanti da un evento di rottura degli organi rotanti degli aerogeneratori.

Lo scopo del presente documento è la conduzione di un'indagine di massima della suddetta problematica, nello spirito di voler fornire gli elementi per una valutazione il più possibile completa in considerazione dell'estrema complessità e variabilità del fenomeno di rottura.

Partendo dalla definizione del fenomeno e individuandone i principali e più comuni fattori scatenanti, verrà successivamente illustrato quello che è attualmente considerato l'approccio simulativo canonico e sarà valutato il realismo delle differenti ipotesi adottate nella modellazione matematica. Si procederà dunque all'effettuazione di un calcolo simulativo per uno scenario ipotetico di distacco nel caso specifico di un aerogeneratore con le stesse caratteristiche di quelli che verranno utilizzati in progetto.

## **2. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO**

La presente proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione dell'impianto di produzione di energia elettrica da fonte eolica denominato "ENNA" di potenza 72 MW (di seguito il "Progetto" o "l'Impianto"), nel Comune di Enna (EN), e relative opere di connessione, nel Comune di Pietraperzia (EN). Il Progetto prevede l'installazione di 18 aerogeneratori eolici di potenza nominale pari a 4 MW ciascuno (per un totale installato di 72 MW).

Nelle immagini si seguito riportate si può individuare la localizzazione dell'impianto in oggetto.

Gli aerogeneratori verranno collegati tra loro tramite cavi in MT a 36 kV che trasporteranno l'energia prodotta presso il punto di connessione alla rete elettrica.

Conformemente a quanto indicato nella soluzione tecnica minima generale di connessione comunicata dalla società TERNA S.p.a. in data 18/11/2022 C.P. 202202507 la connessione del presente impianto avverrà in antenna a 36 kV con una nuova stazione elettrica (SE) di trasformazione 150/36 kV della RTN, da inserire in entra - esce sulle linee RTN a 150 kV "Terrapelata - Barrafranca" e "Caltanissetta CP – Butera SE".





Figura 1 Inquadratura geografica del sito di interesse (fuori scala)

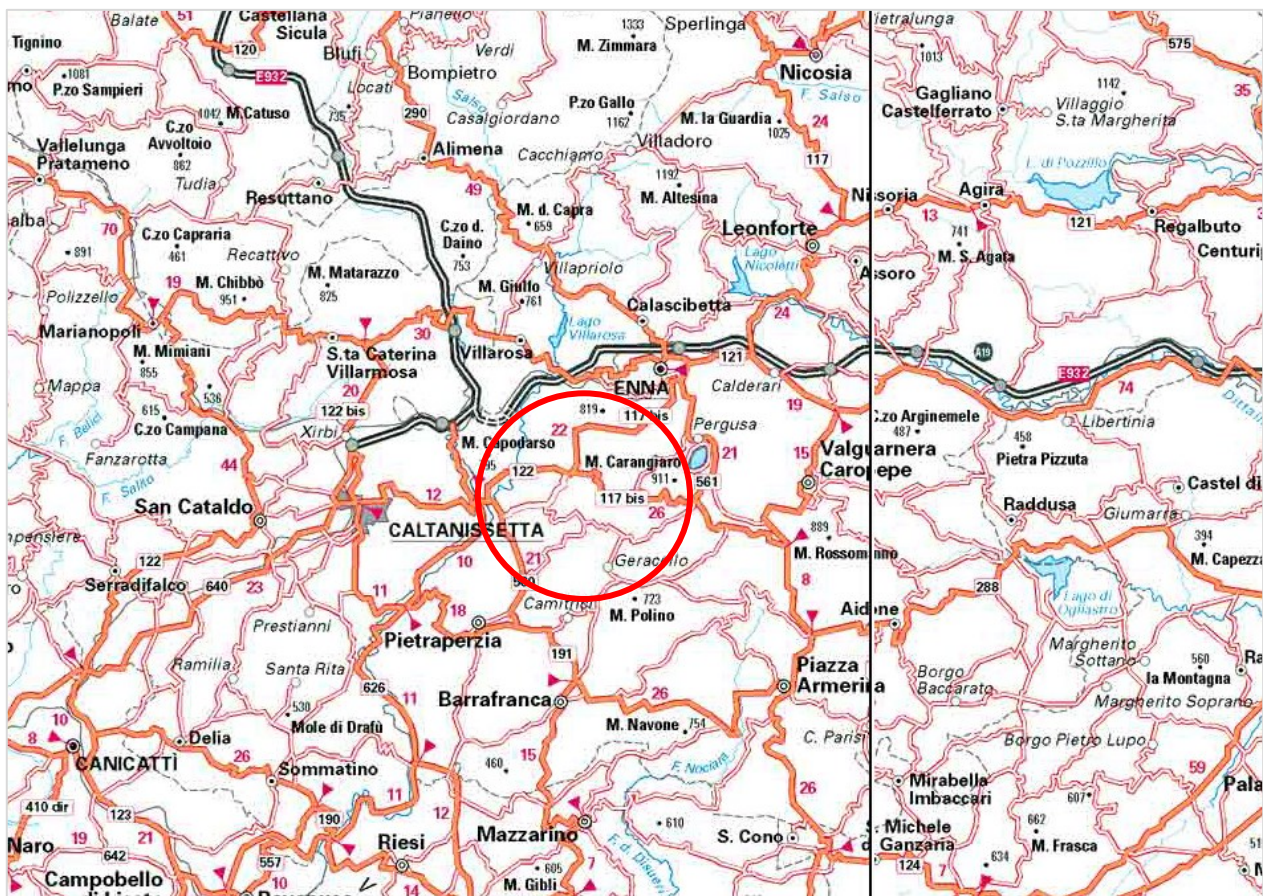
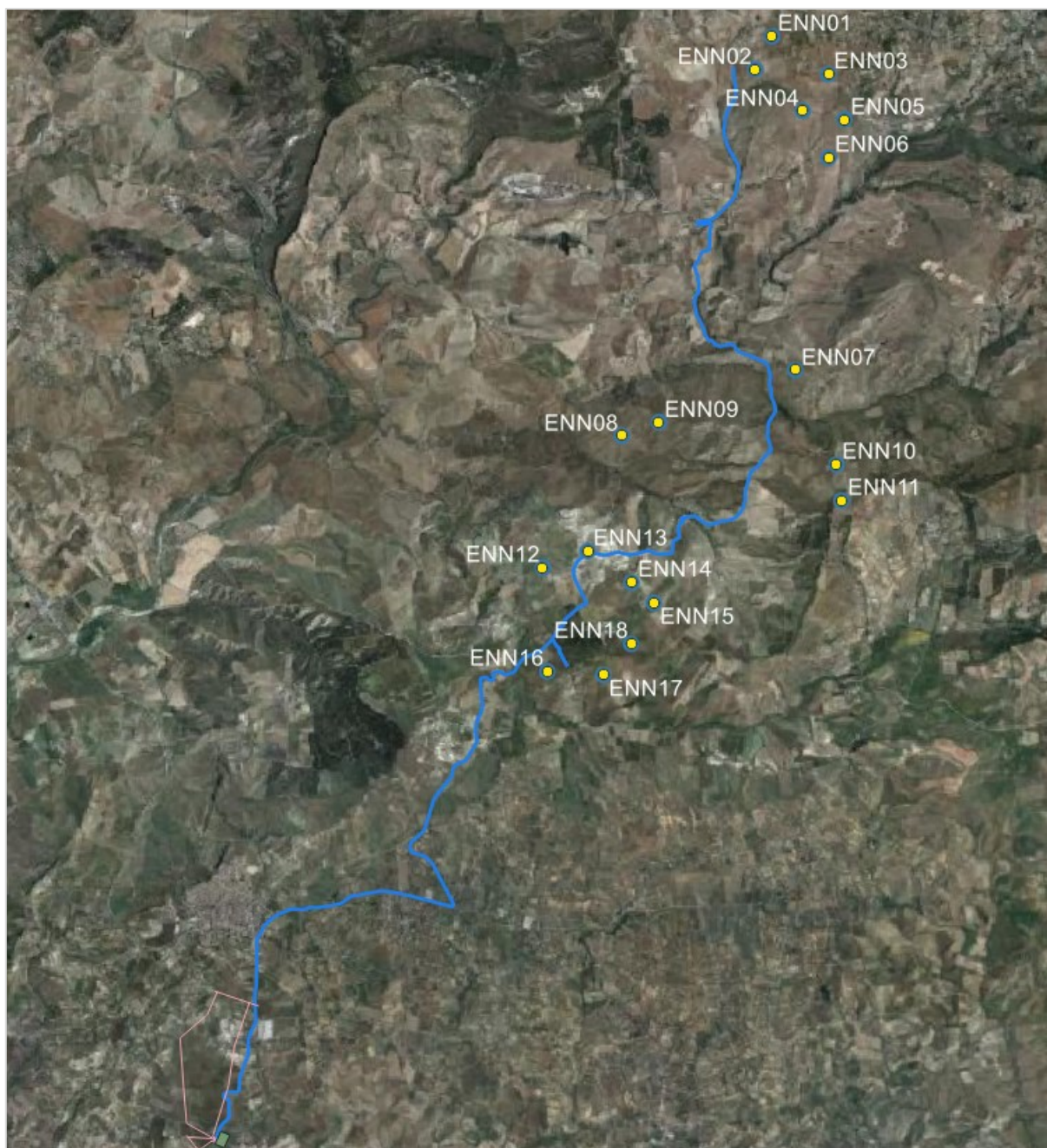


Figura 2 Inquadratura del sito di interesse (fuori scala)





*Figura 3 Inquadramento geografico del sito d'interesse su foto satellitare (fonte Google LLC)*



### 3. INTRODUZIONE ALLA TEMATICA

Forniamo innanzitutto alcuni cenni sull'aerogeneratore, sulle sue parti e sui fondamenti del suo funzionamento. Le pale, che vengono messe in rotazione dall'insieme delle azioni aerodinamiche della corrente ventosa, sono fissate su un mozzo e con esso costituiscono il rotore. Il mozzo trasmette il moto per via di un collegamento rigido su un primo albero di trasmissione, detto albero lento. Al fine di ottenere un valore accettabile di efficienza dal generatore, tale velocità di rotazione (ridotta a pochi giri al minuto per un aerogeneratore di grandi dimensioni) viene incrementata mediante un moltiplicatore di giri azionato dall'albero lento. L'albero in uscita, detto veloce, ruoterà a una velocità angolare pari a quella dell'albero lento per il rapporto di trasmissione installato. Tali componenti meccanici sono situati entro una cabina rigida detta navicella, a sua volta installata su un supporto-cuscinetto girevole che consente di variare l'orientamento del gruppo navicella-rotore con facilità secondo la direzione del vento.

Il controllo della potenza generata e della velocità di rotazione è reso possibile da un sistema centralizzato che interviene su più parametri, tra cui il calettamento delle pale (è possibile ruotare le pale intorno al loro asse principale per variare l'incidenza relativa della vena fluida, e con essa l'intensità e direzione della risultante aerodinamica) e l'orientamento della navicella (controllo dell'imbardata o yaw).

A regime, il piano del rotore sarà sempre orientato perpendicolarmente alla direzione del vento, offrendo costantemente lo stesso profilo alare delle pale e garantendo il mantenimento del verso orario di rotazione indipendentemente dalla direzione del vento. Da ciò ne segue che in condizioni operative il verso della velocità tangenziale della pala è sempre noto.

La letteratura di settore ha studiato vari casi di rischio di caduta oggetti dall'alto connesso alla operatività di un aerogeneratore, fondamentalmente raggruppabili in due categorie di base:

- caduta di frammenti di ghiaccio formatisi sulla pala;
- rottura accidentale di pezzi meccanici in rotazione.

Considerate le caratteristiche climatiche dell'area d'impianto nel caso in esame, si sceglie di tralasciare il fenomeno della caduta di frammenti di ghiaccio (la cui incidenza statistica si può considerare praticamente trascurabile) per concentrarci sull'indagine del danno che potrebbe essere provocato da elementi rotanti in caso di rottura.

La rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva e dei materiali



impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, per ragioni di sicurezza, l'evento viene preso in considerazione nella realizzazione di un progetto.

Il fenomeno di rottura di elementi rotanti di un aerogeneratore, nella maggior parte dei casi, si può distinguere in due tipologie:

- distacco di una delle pale dal mozzo
- rottura dell'estremità di pala.

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni.

### **3.1. DISTACCO DELLA PALA**

Come già accennato, la pala è calettata sul mozzo mediante una giunzione bullonata. Potrebbe accadere che, per varie ragioni, si possa verificare la rottura di tale collegamento. Nella maggior parte dei casi tale rottura dipende dal cedimento dei prigionieri che collegano il corpo strutturale della pala al mozzo.

### **3.2. ROTTURA DELL'ESTREMITÀ DI PALA**

Le pale dei rotori sono realizzate in materiale composito: tipicamente fibra di vetro rinforzata con materiali plastici quali il poliestere, o fibre epossidiche. La scelta dei materiali è dettata dalla necessità di garantire una resistenza strutturale adeguata alle variabilità delle sollecitazioni di natura aerodinamica e meccanica, contenendo al tempo stesso la massa delle parti in rotazione.

A seguito di traumi meccanici di particolare intensità, si può manifestare un danneggiamento strutturale della pala dell'aerogeneratore. La discontinuità nella resistenza strutturale può determinare l'apertura di una cricca. Benché le fibre che compongono la pala tendano nella maggior parte dei casi a mantenerla comunque unita in unico pezzo, per quanto gravemente danneggiato, la frattura può propagarsi fino a determinarne la frammentazione.

Il principale fenomeno che comporta questo tipo di rottura della pala è la fulminazione diretta atmosferica, proprio per questa ragione le normative tecniche vigenti prescrivono dei sistemi di protezione: ad esempio la norma CEI 81-1 individua la classe di protezione più elevata (Classe I) per gli aerogeneratori, che corrisponde a un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano dei danni al sistema). Le pale sono quindi protette da sistemi di drenaggio della corrente di fulmine (vi sono tipicamente dei recettori metallici all'estremità della



pala e lungo l'apertura della stessa, collegati a un sistema di messa a terra) che consentono di scaricare buona parte delle correnti indotte da fulminazione. Tuttavia, può capitare che la corrente di fulmine effettiva ecceda i limiti progettuali fissati dalle normative tecniche di omologazione. A seconda dell'entità della scarica, si potrebbe manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che comporta la separazione dei due gusci del rivestimento. La dimensione dei frammenti che eventualmente si distaccano è altamente variabile e non facilmente prevedibile, considerata la natura dell'evento.

### **3.3. CONSIDERAZIONI SUL MOTO DI UN ELEMENTO ROTANTE**

La valutazione della traiettoria del moto di un elemento rotante in seguito al distacco dal rotore costituisce, dal punto di vista della fisica, la combinazione di un problema di balistica classica con la stima delle azioni aerodinamiche e degli effetti del moto rotazionale del corpo rigido.

Da una prima riflessione si potrebbero individuare le condizioni iniziali del moto al momento del distacco di una pala o di un suo frammento. Dalla velocità di rotazione del rotore conosciamo infatti la velocità angolare, che in combinazione con le dimensioni caratteristiche dell'aerogeneratore può dare la velocità tangenziale di cui abbiamo già fatto cenno. La posizione iniziale e l'intensità e verso della corrente ventosa completano i dati di partenza.

Tuttavia, la valutazione delle caratteristiche dell'elemento oggetto di distacco è estremamente complessa, e la forte dipendenza dai particolari costruttivi indica la necessità di uno studio specifico direttamente eseguibile soltanto dal Costruttore. Inoltre, anche quando per assurdo fosse individuato il frammento e la sua modalità di distacco, il calcolo del moto effettivo verrebbe complicato da ulteriori fattori come le azioni aerodinamiche (portanza, resistenza e momento aerodinamico) di cui è difficile se non impossibile tenere conto specialmente per i frammenti irregolari.

## **4. MODELLO E IPOTESI DI CALCOLO**

L'ipotesi di partenza dello studio è che una pala, o un frammento di essa, si distacchi accidentalmente mentre il rotore è in movimento e venga poi proiettata in aria.

Il moto risultante sarà quello di un corpo libero, soggetto all'accelerazione di gravità e alla forza di attrito viscoso con l'aria. La sua dinamica risulta essere piuttosto complessa in quanto è governata da numerose variabili, come la forma dell'oggetto e la sua massa. Inoltre, la rottura della

pala, combinata al movimento del rotore, imprimeranno all'oggetto distaccato un moto rototraslatorio di cui non è possibile prevedere la componente rotatoria.

L'analisi sarà quindi effettuata mediante un modello cinematico semplificato, in cui le approssimazioni effettuate sono tutte in vantaggio della sicurezza. Al fine del calcolo si assumerà che il moto della pala sia assimilato al moto bidimensionale (x-y) parabolico di un punto materiale (baricentro) proiettato in aria, sottoposto solo all'accelerazione di gravità  $g$  e con velocità iniziale funzione della velocità di rotazione delle pale. Nella figura seguente viene rappresentato il moto parabolico adottato per lo studio.

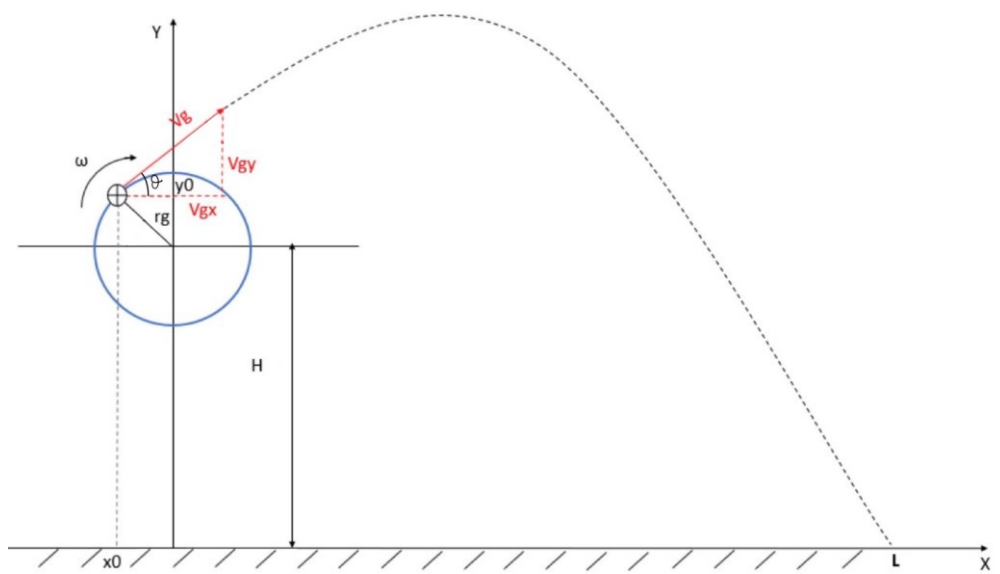


Figura 1: Moto parabolico del punto materiale

Le ipotesi cautelative applicate al modello, garantendo una gittata massima maggiore rispetto a quella reale, sono le seguenti:

- Si trascura l'effetto dell'energia cinetica dissipata in fase di rottura, in questo modo la velocità iniziale del baricentro sarà pari alla velocità tangenziale del punto appena prima che si stacchi;
- Si trascura l'effetto delle forze di attrito dell'aria;
- Si trascura il contributo del vento in direzione perpendicolare al moto dell'oggetto.

Data la disomogenea distribuzione di massa lungo la pala, una buona approssimazione è considerare il baricentro di pala posto a circa a 1/3 della lunghezza di pala, o di parte di essa, a

partire dalla radice. La distanza del baricentro dal centro di rotazione ( $r_g$ ) è calcolata come la somma tra la posizione del baricentro sulla pala e la distanza tra il centro di rotazione e la giuntura della pala al mozzo.

Si assume che la pala si comporti come un corpo rigido, quindi tutti i punti lungo essa hanno la stessa velocità di rotazione ( $n$ ). La velocità tangenziale iniziale del baricentro ( $v_g$ ) è calcolata nel seguente modo:

$$v_g = \frac{2\pi n}{60} r_g$$

L'angolo  $\theta$  è l'angolo formato tra la velocità tangenziale iniziale del punto ( $v_g$ ) e il piano orizzontale. Le componenti di  $v_g$  lungo gli assi x e y sono calcolati nel seguente modo:

$$v_{gx} = v_g * \cos \theta$$

$$v_{gy} = v_g * \sin \theta$$

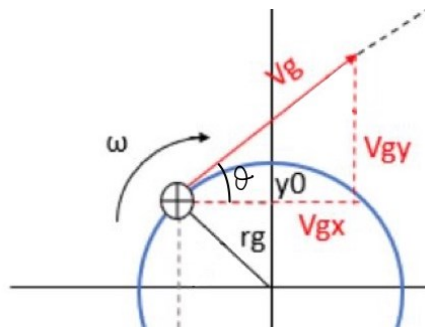


Figura 2: Focus sulle grandezze in gioco

## 5. CALCOLO DELLA GITTATA

Le equazioni che descrivono il moto sono:

$$a_y = -g$$

$$a_x = 0$$

Da cui segue:

$$y = H_g + v_g t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2$$

$$x = v_g t \cos \theta + x_0$$

dove:

- $H_g$  è l'altezza iniziale del baricentro del corpo
- $v_g$  velocità tangenziale iniziale del baricentro del corpo
- $t$  è il tempo di volo
- $g$  è l'accelerazione di gravità
- $\theta$  angolo di lancio

L'altezza iniziale del baricentro del corpo ( $H_g$ ) varia in base all'angolo  $\theta$  ed è calcolata come segue:

$$H_g(\vartheta) = H_{mozzo} + r_g \cos \theta$$

Il moto si conclude quando il corpo tocca terra, che corrisponde alla condizione  $y=0$ , ovvero:

$$H_g + v_g t \sin \theta - \frac{1}{2} g t^2 = 0$$

L'equazione presenta due soluzioni, tuttavia, essendo che il tempo  $t$  può assumere solo valori positivi, l'unica soluzione valida risulta:

$$t = \frac{1}{g} \left( v_g \sin \theta + \sqrt{v_g^2 \sin^2 \theta + 2 g H_g} \right)$$

Tale espressione può essere sostituita all'interno dell'equazione di moto lungo l'asse  $x$  ottenendo l'equazione della gittata:

$$x = \frac{v_g}{g} \cos \theta \left( v_g \sin \theta + \sqrt{v_g^2 \sin^2 \theta + 2 g H_g} \right)$$

Il massimo della funzione darà la condizione di gittata massima, la quale dipende dall'angolo di lancio  $\theta$ , dalla velocità tangenziale  $v_g$  (e quindi dalla velocità di rotazione e dalla posizione del baricentro del corpo rispetto al mozzo), e dalla quota iniziale  $H_g$  del baricentro del corpo che si distacca.

Ricordiamo la relazione tra la velocità tangenziale e quella angolare

$$v_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g$$



dove:

- $\omega$  velocità angolare di rotazione
- $r_g$  distanza del baricentro del corpo dal centro di rotazione

ed esprimiamo l'altezza iniziale del baricentro del corpo in funzione delle dimensioni caratteristiche dell'aerogeneratore e dell'angolo geometrico di lancio (che corrisponde all'angolo di rotazione del rotore), possiamo esprimere la gittata  $x$  come funzione della sola variabile  $\vartheta$ , in modo da poterla studiare agevolmente e ricavarne il valore massimo.

$$x(\theta) = \frac{\omega^2 r_g^2 \sin^2 \theta}{2g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2g H_{\text{mozzo}} + r_g \cos \theta}{\omega^2 r_g^2 \sin \theta}} \right) + r_g \sin \theta$$

## 6. RISULTATI DELL'ANALISI PER WTG PARCO EOLICO ENNA

### 6.1. DISTACCO DELLA PALA

Le caratteristiche definite degli aerogeneratori impiegati saranno definiti in sede di acquisto per la realizzazione delle opere. Gli aerogeneratori scelti, prodotti dalla società Vestas, è il modello V166 che presenta le seguenti specifiche:

- Rotore:
  - Altezza mozzo 117 m
  - Altezza massima 200 m
  - Diametro 166 m
  - Numero pale 3
  - Lunghezza pala 83 m
- Condizione di funzionamento
  - Velocità cut-in 3 m/s
  - Velocità cut-out 25 m/s
  - Velocità angolare massima 12.7 rpm

Il primo caso che è stato affrontato per il calcolo della gittata massima è il distacco della pala dal mozzo.

Considerando le specifiche tecniche della pala e gli ulteriori dati di input di seguito riportati:

- Distanza del baricentro dal centro di rotazione 27,67 m
- Velocità tangenziale iniziale del baricentro 63,74 m/s

le variabili della funzione  $x(\vartheta)$  nel punto di massimo assumono i seguenti valori:

- $\theta_{max} = 65^\circ$
- $H_{max} = 142,38 \text{ m}$

Da cui seguono la gittata massima teorica:

- $x_{MAX} = 228,27 \text{ m}$

Sommando la distanza del vertice della pala (55,33 m) alla gittata massima teorica si ha la gittata massima effettiva degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale di 283,60 m.

Nel grafico seguente si mostra l'andamento della gittata della pala in funzione dell'angolo di lancio  $\theta_{max}$ .

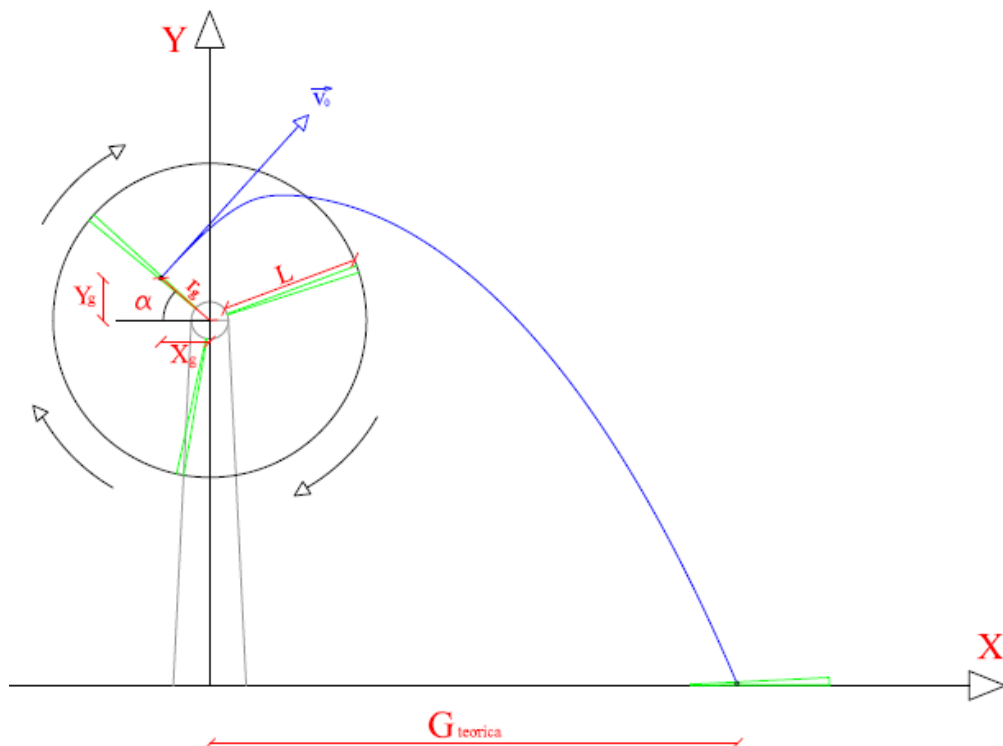


Figura 3: Andamento della traiettoria della gittata del baricentro in funzione dell'angolo di lancio  $\theta$  (distacco pala)

## 7. CONCLUSIONI

I valori ottenuti relativi alla gittata massima del corpo scagliato in aria in caso di distacco della pala, risulta essere 283,60 m.

Si è già accennato all'estrema complessità della conduzione di uno studio probabilistico esatto per quanto concerne il distacco di frammenti di pala, per via delle numerose variabili coinvolte e della non linearità delle stesse.

Inoltre, le pale dei rotori di progetto, come precedentemente accennato, sono realizzate in fibra di vetro rinforzato con materiali plastici quali il poliestere o le fibre epossidiche. L'utilizzo di questi materiali limita sino a quasi annullare la possibilità di distacco di parti della pala mentre la stessa è in rotazione: anche in caso di gravi rotture le fibre che compongono la pala la mantengono, di fatto, unita in un unico pezzo (seppure gravemente danneggiato), e i sistemi di controllo dell'aerogeneratore riducono pressoché istantaneamente la velocità di rotazione, eliminando la possibilità che un frammento di pala si stacchi e venga proiettato verso l'alto. Infine, è doveroso precisare che le turbine eoliche sono dotate di un sistema di sicurezza in grado di mandare in pausa la macchina a seguito di sbilanciamenti del rotore, eccessivo carico aerodinamico sulla pala o scostamenti sensibili tra velocità del vento e power curve. Si può quindi concludere che la rottura improvvisa e di netto di un frammento della pala con proiezione dello stesso è praticamente molto poco probabile.

Al fine di garantire le massime condizioni di sicurezza durante l'esercizio dell'impianto, si è verificato che le distanze tra gli aerogeneratori e i recettori nella zona siano maggiori della gittata massima in caso di distacco della pala.