

- biogas ●
- biometano ●
- eolico ●
- fotovoltaico ●
- efficienza energetica ●
- waste to chemical ●

A.7 – Analisi effetti rottura degli organi rotanti

Progetto definitivo

PARCO EOLICO POTENZA

Comuni di Potenza (PZ) e Picerno (PZ)

Località "Poggi di San Michele"

N.REV.	DESCRIZIONE	ELABORATO	CONTROLLATO	APPROVATO	
a	Emissione	Ing. Pietro Montemurro Ord. Ing. MT n. 1057 GLOREN Srl	Ing. Pietro Montemurro Ord. Ing. MT n. 1057 GLOREN Srl	Ing. Giuseppe Gravela Ord. Ing. MT n. 1028 GLOREN Srl	IT/EOL/E/POTE/PDF/S/RS/09/a 31/05/2023 Via Ivrea, 70 (To) Italia T +39 011.9579211 F +39 011.9579241 asja.potenza@pec.it

asja | Potenza

GLOREN
Engineering
GLOREN S.r.l.
Via F. Parri, 40 - 75100 Matera
Tel/Fax 0835.1975109 - glorensr@gmail.com

INDICE

1. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	3
2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA	5
3. STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE	7
4. ANALISI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELL'AEROGENERATORE	10
4.1 SISTEMI DI CONTROLLO E GESTIONE DEGLI AEROGENERATORI	11
4.2 PROTEZIONE E RILEVAMENTO DEL GHIACCIO	11
4.3 PROTEZIONE CONTRO LA FULMINAZIONE	12
5. CONCLUSIONI	13
ALLEGATO 1 CALCOLO DELLA TRAIETTORIA DI UNA PALA EOLICA IN CONDIZIONI NORMALI DI FUNZIONAMENTO: TECHNICAL REPORT VESTAS.....	15
ALLEGATO 2 STRALCI CARTOGRAFICI SU ORTOFOTO CON INDICAZIONE DI UN BUFFER DI 210 METRI INTORNO A CIASCUNA WTG DI PROGETTO	27
ALLEGATO 3 CALCOLO DI GITTATA MASSIMA	33

1. DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

La seguente relazione si riferisce al calcolo della Gittata massima degli elementi rotanti per gli aerogeneratori relativi alla proposta progettuale per la realizzazione di un impianto eolico proposto dalla società ASJA in Agro del Comune di Potenza (PZ).

La proposta progettuale è finalizzata alla realizzazione di un impianto eolico per la produzione di energia elettrica da fonte rinnovabile eolica, costituito da 5 aerogeneratori tripala (WTG) ad asse orizzontale, ciascuno di potenza nominale pari a 6,2 MW, per una potenza elettrica complessiva pari a 31 MW, da realizzarsi nell'agro del comune di Potenza (PZ), a circa 6km dal centro abitato in zone a destinazione d'uso prettamente agricolo e di allevamento, in località Poggi San Michele.

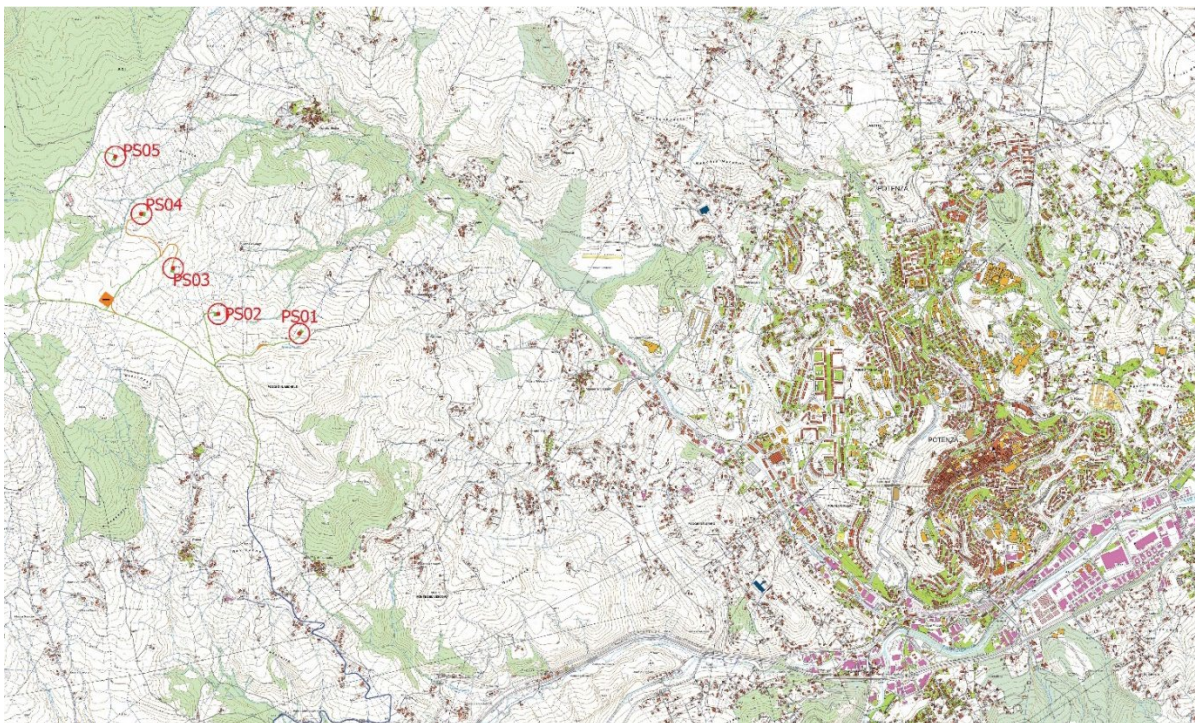


Figura 1 - Inquadramento a scala territoriale e localizzazione dell'impianto di progetto

Di seguito è riportato un inquadramento su ortofoto del layout dell'impianto, in cui sono mostrate le posizioni degli aerogeneratori, la viabilità di nuova realizzazione ed il percorso del cavidotto di connessione alla rete elettrica nazionale.

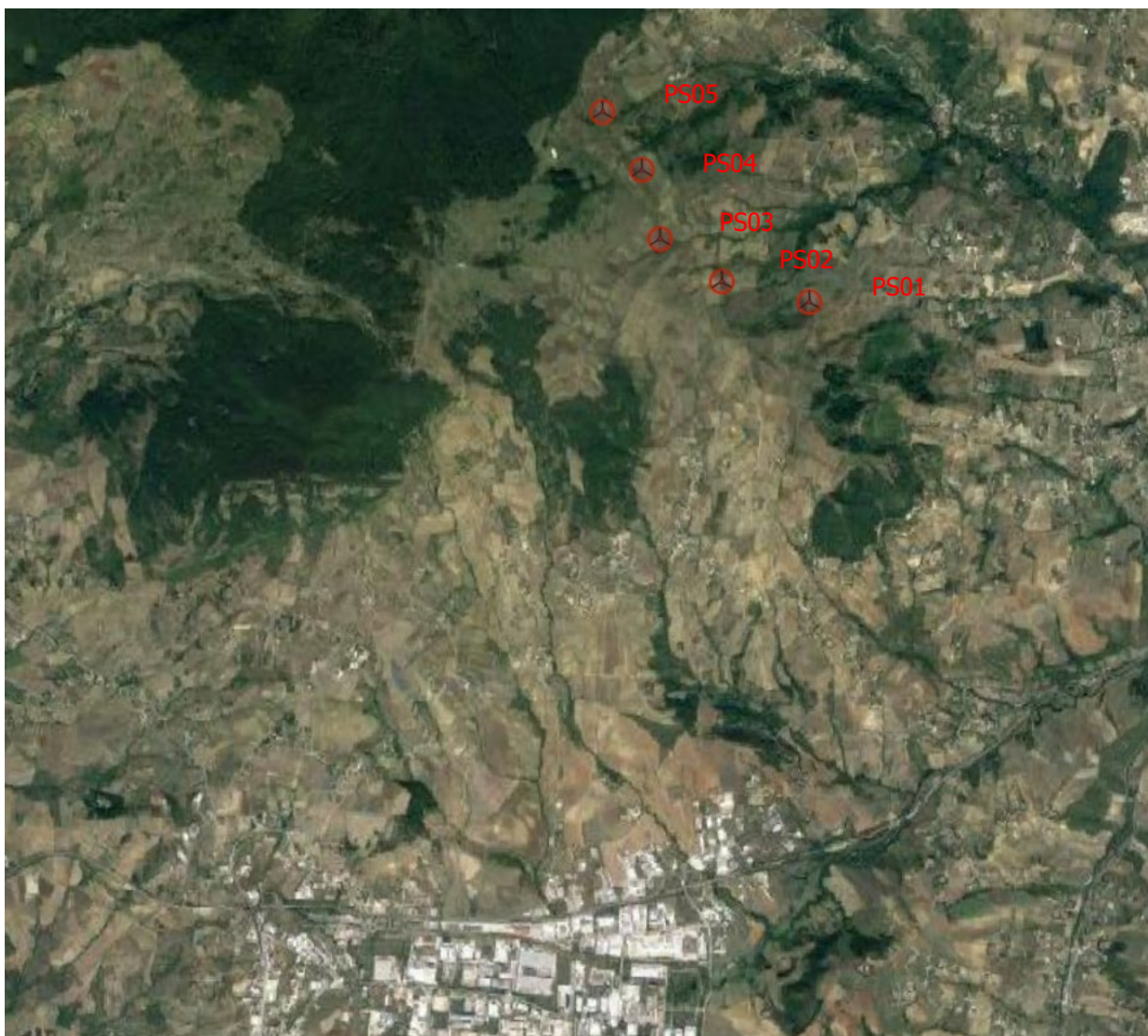


Figura 2 - Inquadramento a scala ridotta dell'area di intervento

Gli aerogeneratori saranno ubicati all'interno dei limiti amministrativi del Comune di Potenza (PZ). Si riportano di seguito le coordinate dei punti di installazione delle macchine previste in progetto.

WTGs	UTM WGS84		Comune	Foglio	Particella
	EST	NORD			
PS01	562445	4499995	Potenza	18	59
PS02	561803	4500145	Potenza	25	116
PS03	561351	4500458	Potenza	25	90
PS04	561217	4500964	Potenza	16	112
PS05	560928	4501389	Potenza	24	13

Tabella 1 – Coordinate WTGs impianto eolico di progetto

2. INQUADRAMENTO DEL PROBLEMA

Nell'ambito della progettazione preliminare dell'intervento, si è ritenuto di procedere con la dimostrazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore ad asse orizzontale, la quale può essere considerata un evento raro, rispetto alla tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse.

Nonostante ciò, al fine della sicurezza la stima della gittata massima di un elemento rotante assume un'importanza rilevante per la progettazione e l'esercizio di un impianto eolico.

Le pale dei rotori di progetto 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 ad annullare, la probabilità 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), ed 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.

Tra le maggiori cause di danno accidentale, come è riportato dalle statistiche, vi sono danni prodotti direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà progettato e realizzato con sistema di protezione dalle fulminazioni, in accordo alla norma IEC 61400-24 – livello I.

Dunque, è possibile affermare che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è del tutto trascurabile.

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è molto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, quindi, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, deve necessariamente essere effettuata dalla casa produttrice, in quanto presuppone conoscenze specifiche spesso coperte da brevetti.

È per questo motivo che il problema del calcolo della gittata di elementi rotanti è stato analizzato dalla società VESTAS¹, la quale rappresenta nell'ambito, uno delle principali società di costruzione di turbine.

Lo studio effettuato dalla società VESTAS, di seguito riportato, aveva come obiettivo quello di determinare la distanza che la pala di un aerogeneratore raggiunge in caso di distacco dal mozzo mentre la stessa è in funzione. Il calcolo è stato effettuato su otto modelli di aerogeneratori, aventi lunghezza delle pale da 25 a 54,6 metri e velocità di rotazione da 26rpm a 17.7 rpm (ovviamente con gli aerogeneratori aventi pale di maggiore dimensione che funzionano a velocità di rotazione inferiori). Nello studio sono state considerate tre condizioni:

1. moto in assenza di attrito dell'aria;
2. moto in presenza di attrito dell'aria
3. moto in presenza di attrito dell'aria e di rotazioni intorno agli assi della pala.

Come riportato nello studio, la prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%.

I risultati emersi dello studio della VESTAS hanno permesso di comprendere come, in ipotesi conservative, la gittata massima per i modelli testati diminuiva sostanzialmente all'aumentare delle dimensioni delle pale e del diminuire del numero di giri.

L'unica eccezione, è il caso della V112 3MW per la quale è stata calcolata una gittata di 147 metri, dovuta all'altezza del mozzo più elevata (119 metri) e alla velocità di rotazione maggiore rispetto alle V82, V90 e V100.

Modello	Lunghezza pala	Velocità rotazione	Altezza mozzo	Gittata
	m	rpm	m	m
V80 - 2MW	39	19,2	80	125
V52 - 850kW	26	25	75	130
V82 - 1,65	40	14,4	78	103
V90-2MW	44	14,9	105	118
V90-3MW	44	16,1	105	77
V100 - 1,8MW	49	16,6	95	104
V112 - 3MW	54,6	17,7	119	147

Tabella 2 – Gittata calcolata nello studio Vestas citato per varie tipologie di aerogeneratore

Si nota dunque, che la massima gittata calcolata è inferiore ai 150 metri per tutte le tipologie di aerogeneratori oggetto di studio.

¹ VESTAS - Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento

3. STUDIO DEL PROBLEMA PER IL CASO DI SPECIE

La procedura seguita per il calcolo della gittata massima, in caso di rottura accidentale di un elemento rotante di un aerogeneratore, prende in considerazione le condizioni al contorno più gravose, in maniera tale da aumentare il grado di sicurezza massimo.

Uno studio rigoroso del problema della gittata degli elementi rotanti richiede la conoscenza di elementi progettuali che sono in possesso unicamente del costruttore delle turbine (tra questi, in particolare, l'evoluzione delle sezioni, dei pesi e dei coefficienti di portanza e resistenza lungo l'aerogeneratore).

La Regione Campania a seguito di quanto prescritto dal Decreto del Ministero dello sviluppo economico 10 settembre 2010 - Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili - Allegato 4 - punto 7 "Studio sulla gittata massima degli elementi rotanti nel caso di rottura accidentale" per gli impianti di produzione di energia rinnovabile da fonte eolica" ha redatto un foglio di calcolo Excel per velocizzare e facilitare il calcolo della gittata massima delle pale.

Per la presente relazione, sebbene il progetto sia ubicato sul territorio regionale della Basilicata e quindi il riferimento normativo non abbia valore di legge, si è ritenuto comunque opportuno utilizzare il foglio di calcolo predisposto dalla Regione Campania, considerandolo un utile punto di riferimento tecnico.

L'applicazione del foglio di calcolo ha prodotto i seguenti risultati sulla base delle caratteristiche dell'aerogeneratore di progetto.

Seguono di seguito sia le ipotesi adottate che i risultati del calcolo.

Numero di giri al minuto del rotore	n =	8,83	Se non è disponibile il valore di D, inserire almeno $D=2L$			
Lunghezza della pala in metri	L =	83,5	Diametro del rotore	D=	170	
Altezza del mozzo in metri	H_{torre} =	115				

CALCOLO GITTATA MASSIMA

Il calcolo della Gittata è effettuato in funzione dell'angolo di inclinazione della pala rispetto all'orizzontale, in senso orario e ponendo l'angolo di 0° tra il 3° e 4° quadrante

Formula della Gittata Massima per angolo compreso tra 0° e 90°

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} - X_g$$

dove : α = Angolo della pala rispetto all'orizzontale corrisponde all'angolo tra 91° e 180° dell'angolo velocità

$$H_G = H_{torre} + Y_g$$

$$Y_g = r_g \sin \alpha$$

r_g = posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo

$$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3}$$

$X_g = r_g \cos \alpha$ posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre

$$v_{x0} = v_0 \cos (90 - \alpha) = v_0 \sin \alpha$$

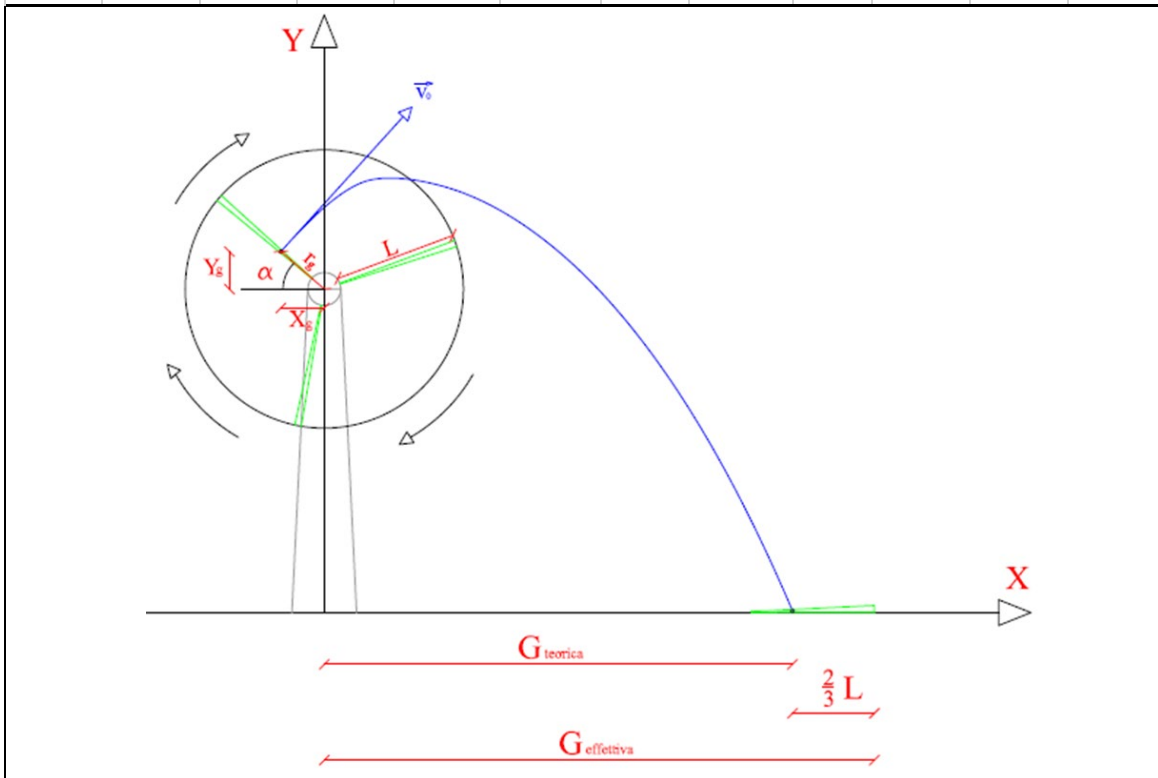
$$v_{y0} = v_0 \sin (90 - \alpha) = v_0 \cos \alpha$$

$$v_0 = \omega r_g = (2\pi n r_g)/60 \quad n = \text{numero di giri al minuto del rotore}$$

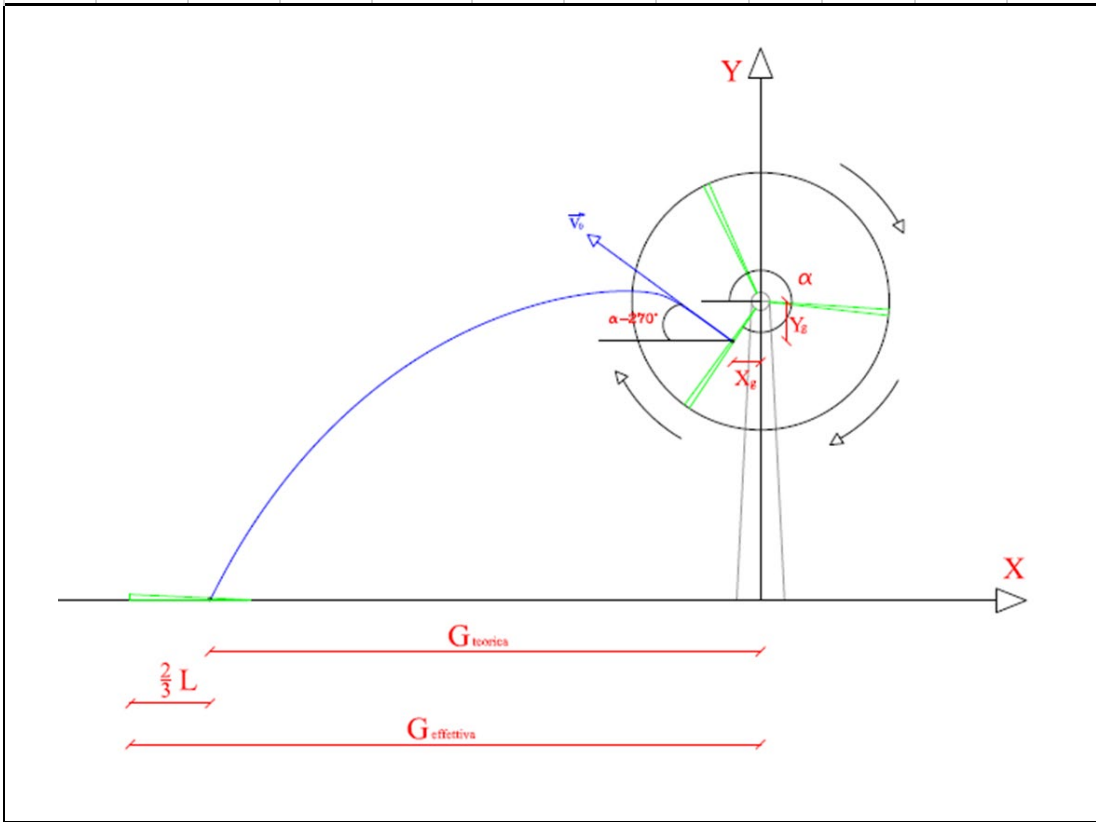
Gittata Effettiva

$$G_{eff} = G + L_g$$

Schema della Gittata per angolo compreso tra 0° e 90°



Schema della Gittata per angolo compreso tra 270° e 360°



Formula della Gittata Massima per angolo compreso tra 270° e 260°

$$G = \frac{v_{x0}(v_{y0} + \sqrt{v_{y0}^2 + 2 * g * HG})}{g} + X_g$$

Siccome abbiamo posto l'angolo 0° tra il 3° e 4° quadrante invertiamo il segno di v_{x0} e X_g

$H_G = H_{\text{torre}} - Y_g$		
$Y_g = r_g \text{ sen } (360 - \alpha) = - r_g \text{ sen } \alpha$		
$r_g =$ posizione del baricentro pari ad 1/3 della lunghezza della pala più raggio mozzo	$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3}$	
$X_g = r_g \text{ cos } (360 - \alpha) = r_g \text{ cos } \alpha = - r_g \text{ cos } \alpha$	posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre	
$v_{x0} = v_0 \text{ cos } (\alpha - 270) = - v_0 \text{ sen } \alpha = - v_0 \text{ sen } \alpha$	$v_{y0} = v_0 \text{ sen } (\alpha - 270) = v_0 \text{ cos } \alpha$	
$v_0 = \omega r_g = (2\pi n r_g)/60$	$n =$ numero di giri al minuto del rotore	v_{x0} negativo perché verso sinistra
Gittata Effettiva		G negativo perché verso sinistra
$G_{\text{eff}} = G - L_g$		

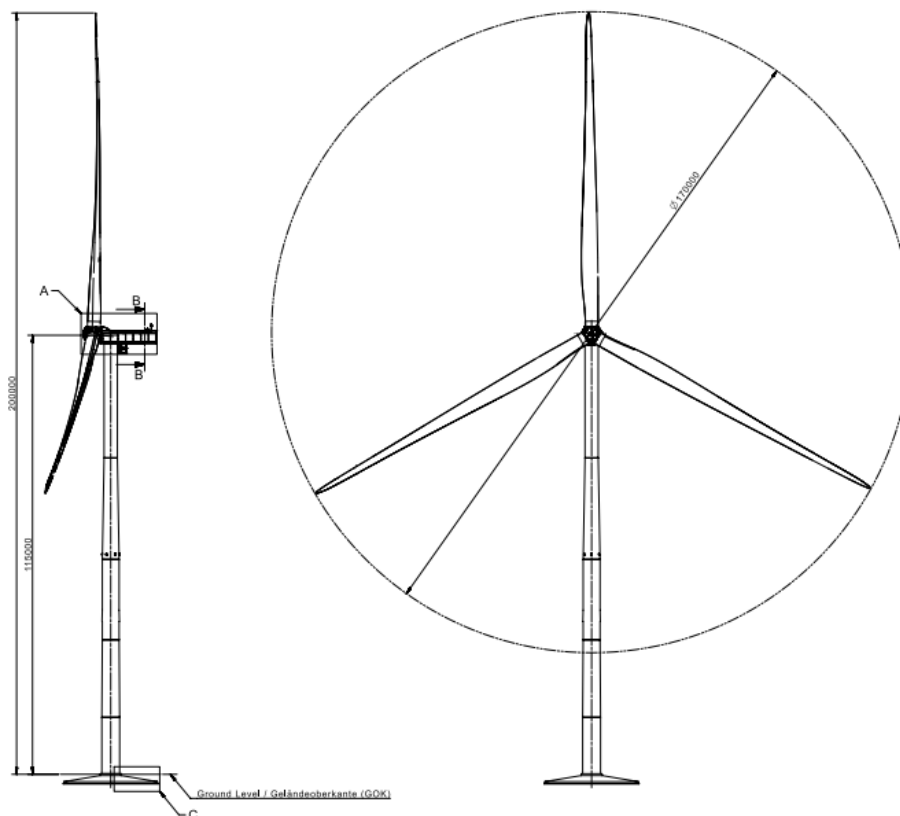
La stima ottenuta è pari a 210 metri e rappresenta la massima distanza alla quale può atterrare la punta della pala a seguito di un eventuale distacco dall'aerogeneratore.

Emersa questa considerazione e osservando gli stralci cartografici, inoltre, si può notare che nel buffer di 210 metri dalle altre WTG non sono presenti edifici di alcuna natura.

Si precisa, in ogni caso, che non sono presenti edifici abitabili nel raggio di 530 metri dalla WTG più vicina ai piccoli centri abitati posti in prossimità dell'impianto, situazione che pone l'impianto in condizioni di estrema sicurezza rispetto al problema della gittata degli elementi rotanti.

4. ANALISI DEI SISTEMI DI SICUREZZA DELL'AEROGENERATORE

Il modello di aerogeneratore adottato è il SIEMENS-GAMESA SG170 6.2 – 6.2 MW che ha una Potenza Nominale pari a 6,2 MW e sarà costituito da una torre di sostegno tubolare metallica a tronco di cono, per un'altezza massima complessiva del sistema torre-pale di 200 mt rispetto al suolo, con rotore di diametro massimo pari a 170m.



Product customer documentation
Developer Package

SIEMENS Gamesa
RENEWABLE ENERGY

Figura 3 – Turbina della tipologia Siemens Gamesa, utilizzata per l'impianto progettato

All'interno della documentazione tecnica prodotta dal produttore degli aerogeneratori, vengono indicati i sistemi di sicurezza dell'aerogeneratore, che si allegheranno a fine relazione.

4.1 Sistemi di controllo e gestione degli aerogeneratori

I sistemi di sicurezza e controllo sono valutati secondo la norma EN ISO 13849-2:20142014 – Sicurezza del macchinario – Parti dei sistemi di controllo relative alla sicurezza – Parte 2: Convalida.

I sistemi di sicurezza mitigano il rischio oltre ad altre misure di protezione.

Tutte le parti rotanti e le aree ad alta tensione sono coperte da protezioni che richiedono uno strumento per la rimozione.

Post valutazione del rischio sono stati individuati i seguenti sistemi di sicurezza:

- Protezione da eccesso di velocità
- Protezione da eccesso di vibrazione
- Attivazione pulsante di arresto di emergenza
- Protezione antitorsione del cavo

La **protezione da eccesso di velocità** utilizza sensori interni per determinare la velocità del rotore e quindi confrontarla con limiti predeterminati. Quando la protezione si attiva (in caso di eccesso di velocità), manda la turbina eolica in modalità di arresto.

La **protezione da vibrazioni e urti eccessivi** è costituita da un dispositivo di rilevamento delle vibrazioni strutturali nelle turbine eoliche, posizionato sulla sommità della torre.

Il dispositivo è configurato per regolare in sicurezza il pitch della pala in caso di forti vibrazioni della sommità della torre o se la navicella è esposta a uno shock meccanico.

Il sistema è progettato per soddisfare i requisiti di sicurezza PLd di Categoria 3 secondo ISO 13849-1:2015.

Ciascuna turbina è dotata di **pulsanti di arresto di emergenza** in vari punti della navicella e della torre. La funzionalità di questi pulsanti di arresto è progettata secondo i requisiti della ISO 13850:2015, ed il sistema soddisfa i requisiti di sicurezza PLd di Categoria 3 secondo ISO 13849-1:2015. La funzione di arresto di emergenza prevale sia sui sistemi di controllo che su quelli di protezione (arresto di imbardata, vibrazioni, velocità eccessiva...), ed è principalmente prevista per la protezione delle persone. Si basa solo su sistemi meccanici e fail-safe.

A protezione in caso di guasto del sistema di controllo dell'imbardata, la torre è dotata di **una protezione antitorsione del cavo**, che consente alla turbina eolica di girare in entrambe le direzioni rispetto alla posizione zero solo entro limiti predeterminati. Il sistema soddisfa i requisiti di sicurezza PLC di Categoria 1 secondo ISO 13849-1:2015.

4.2 Protezione e rilevamento del ghiaccio

Le WTG sono dotate di un sistema di rilevamento del ghiaccio che consente il funzionamento in sicurezza anche in condizioni di ghiaccio sulla pala, configurabile per lavorare in massima produzione o in massima sicurezza.

Il sistema può utilizzare per il rilevamento della presenza di ghiaccio:

- Curva di rilevamento bassa potenza (LPDC)
- Mancato rilevamento del cut-in

- Un sensore esterno, posizionato sulla navicella o sulla pala.

Una volta che il ghiaccio è stato rilevato, viene gestita la seguente risposta:

- Arrestare la turbina, in attesa di riarmo automatico o riarmo manuale
- Arrestare la turbina ed impostare l'imbardata a un angolo specifico
- Adaptive Operation, funzionamento continuo con ottimizzazione della curva di potenza

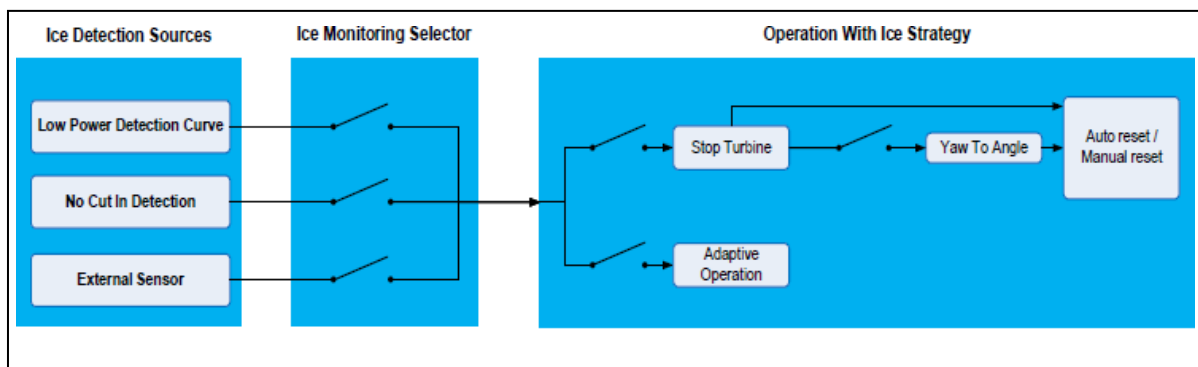


Figura 4 – Rilevamento del ghiaccio e funzionamento con interfaccia per singola turbina.

4.3 Protezione contro la fulminazione

La progettazione complessiva del Lightning Protection System rispetta la norma IEC 61400- 24:2019 "Sistemi di generatori eolici - Parte 24 Protezione contro i fulmini" oltre che la norma IEC 62305-1:2010 "Protezione contro i fulmini - Parte 1: Principi generali, livello di protezione contro i fulmini I".

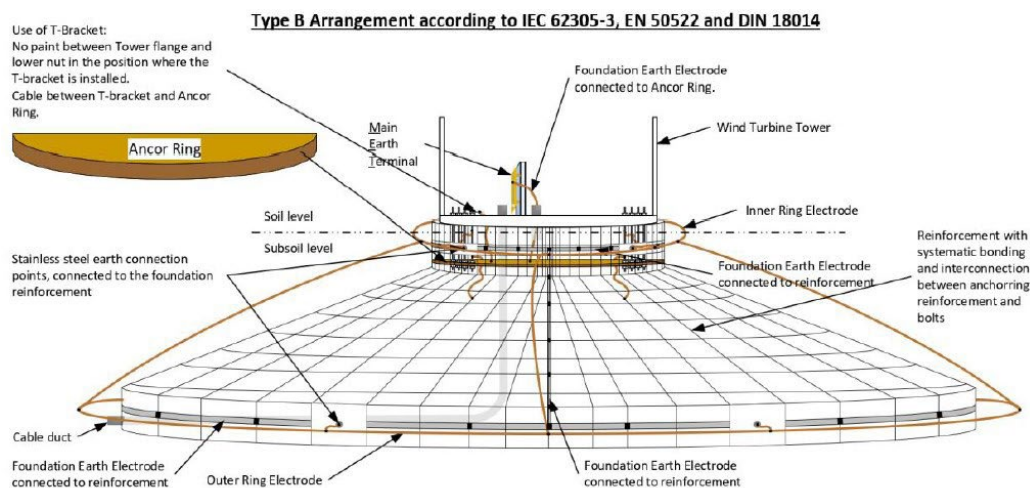


Figura 5 – Principio del sistema Siemens Gamesa con T-bracket

All'interno di questo sistema di protezione contro la fulminazione, la torre funge da parte di collegamento naturale fornendo un collegamento conduttivo dalla navicella alla terra. L'impianto di messa a terra dell'aerogeneratore sarà collegato ad un idoneo impianto di messa a terra di completamento, considerando anche l'adeguata schermatura di tutti i cavi che escono/entrano nella turbina eolica.

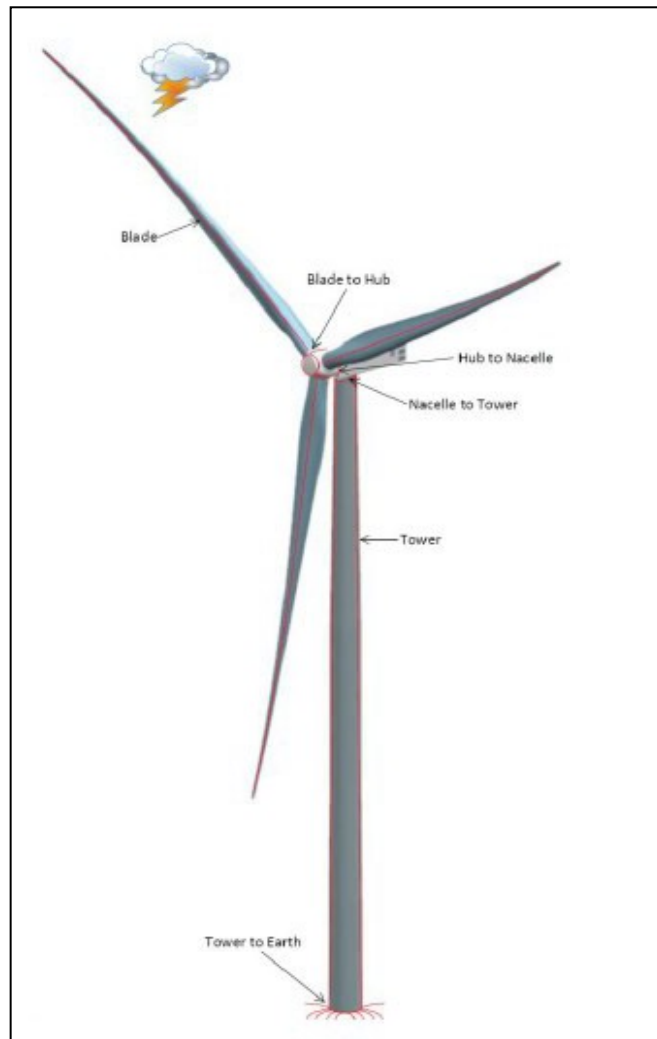


Figura 6 – Schema generico impianto di messa a terra di un aerogeneratore

5. CONCLUSIONI

Come definito nella presente relazione, i fenomeni dovuti alla rottura di elementi rotanti o di frammenti di essi, sono eventi rari, il cui impatto, nel caso in cui dovesse avvenire, si verificherebbe a distanze relativamente contenute. Per questo motivo, si può concludere che:

- la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è certamente inferiore a 210 metri;
- Nel buffer di 210 metri dai luoghi di installazione delle torri non è presente alcun ricettore sensibile.
- Tutti i sistemi di protezione della turbina eolica garantiscono un corretto funzionamento ed un arresto di emergenza anche in condizioni climatiche critiche.

Dunque, si ritiene che non sussistano problemi di sicurezza legati alla ipotetica e remota gittata di elementi rotanti.

Alla presente relazione, al fine di esplicitare le informazioni fornite, si allegano i seguenti documenti tecnici:

- **Allegato 1:** Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni normali di funzionamento:
Technical Report VESTAS
- **Allegato 2:** Stralci cartografici su ortofoto con indicazione di un buffer di 210 metri intorno a ciascuna WTG di progetto
- **Allegato 3:** Calcolo della gittata massima

ALLEGATO 1 CALCOLO DELLA TRAIETTORIA DI UNA PALA EOLICA
IN CONDIZIONI NORMALI DI FUNZIONAMENTO:
TECHNICAL REPORT VESTAS

Calcolo della traiettoria di una pala eolica in condizioni nominali di funzionamento

Indice

- 1 INTRODUZIONE
- 2 RISULTATI
- 3 METODOLOGIA E IPOTESI
- 4 VELOCITÀ DI ROTAZIONE
- 5 FORZE AGENTI SULLA TRAIETTORIA PALA
- 6 CARATTERISTICHE DELLA PALA
 - 6.1 CASI DI STUDIO
 - 6.2 CASO 1: MOTO IRROTAZIONALE
 - 6.3 CASO 2: MOTO IRROTAZIONALE
 - 6.4 CASO 3: MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO
- 7 ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE10
 - 7.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE10
 - 7.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA12
- 8 CONCLUSIONI
- 9 RIFERIMENTI
- 10 APPENDICE

1 INTRODUZIONE

L'obiettivo di questo lavoro è determinare la distanza che una pala di un aerogeneratore raggiunge nel caso di distacco dal mozzo mentre la macchina è in funzione. Il calcolo è stato eseguito su otto aerogeneratori VESTAS:

- V52-850kW con una pala di lunghezza pari a 25 m e una velocità di rotazione massima a regime di 26 RPM posto su una torre di altezza pari a 75 m;
- V80-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 39 m e una velocità di rotazione massima a regime di 19,2 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V82-1,65MW con una pala di lunghezza pari a 40 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,4 RPM posto su una torre di altezza pari a 78 m;
- V90-1,8MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V90-2,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14,9 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V90-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 44 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16.1 RPM posto su una torre di altezza pari a 105 m;
- V100-1,8MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 16.6 RPM posto su una torre di altezza pari a 95 m;
- V100-2.0MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 14.9 RPM posto su una torre di altezza pari a 125 m;
- V100-2.6MW con una pala di lunghezza pari a 49 m e una velocità di rotazione massima a regime di 13.4 RPM posto su una torre di altezza pari a 80 m;
- V112-3,0MW con una pala di lunghezza pari a 54,6 m e una velocità di rotazione massima a regime di 17.7 RPM posto su una torre di altezza pari a 119 m.

Per la pala della V80-2,0MW si è fatto uno studio completo ipotizzando tre condizioni: la prima, più conservativa, include solo le forze d'inerzia ed esclude le forze viscosi; la seconda include le forze viscosi; la terza considera il moto della pala completo. La prima condizione di carico è quella che dà la massima gittata, ma in realtà le forze di resistenza che si esercitano sulla pala fanno sì che la gittata reale sia inferiore di circa il 20%. Per la pala V52-850kW, V82-1,65MW, V90-1,8MW, V90-2,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8MW, V100-2.0MW, V100-2.6MW, V112-3,0MW si è fatto uno studio considerando la condizione più conservativa e cioè considerando le sole forze inerziali ed escludendo l'attrito, per cui i risultati ottenuti sono da considerare del 20% maggiori di quelli reali.

2 RISULTATI

I risultati dell'analisi indicano che con lo studio più complesso (caso 3) la gittata della pala per la V80- 2,0MW (nel caso peggiore, ma non reale (caso 1) è 125 m) è di poco inferiore ai 100m. La gittata della pala per la V52-850kW è di ca. 130 m, per la V82-1,65MW è di ca. 103 m, per la V90-1,8-2,0MW è di ca. 118 m, per la V90-3,0MW è di ca. 77 m, per la V100-1,8MW è di circa 104 m, per la V100-2.0MW è di circa 98 m, per la V100-2,6MW è di circa 77.4 m e infine per la V112-3,0MW è c. 147 m (per la V52-850kW, V82- 1,65MW, V90-1,82,0MW, V90-3,0MW, V100-1,8MW, V100-2,0MW, V100-2,6MW e per la V112-3,0MW, unico caso studiato quello conservativo, ma non reale per cui il risultato è maggiore del 20% rispetto al reale)

3 METODOLOGIA E IPOTESI

Da un punto di vista teorico, se non si considerano le forze aerodinamiche la massima gittata si ottiene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° (135° in posizione azimutale). Le forze di resistenza che agiscono sulla pala in realtà rendono minore il tempo di volo e quindi la gittata. Il moto reale è molto più complesso, in quanto dipende dalle caratteristiche aerodinamiche e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala).

4 VELOCITA' DI ROTAZIONE

La velocità di distacco della pala dal rotore è stata incrementata del 16% passando da 26 a 31 RPM per la V52-850kW, del 5% per la V80-2,0MW, passando così da 19 a 20 RPM; per la V82-1,65MW e V90- 1,8MW-2,0MW, invece, è stata incrementata del 10% passando così da 14,4 a 15,84 e da 14,9 a 16,39 RPM rispettivamente, per la V90-3,0MW è stata incrementata del 5% passando da 14,9 a 15,7 RPM, per la V100- 1,8MW è stata incrementata del 5% passando da 16.6 a 17.4 RPM, per la V100-2.0MW è stata incrementata del 5% passando da 14.9 a 15.6 RPM, per la V100-2.6MW è stata incrementata del 5% passando da 13.4 a RPM e per la V112-3,0MW è stata incrementata del 5% passando da 17.7 a 18.6 RPM. Pertanto, la velocità di rotazione del rotore considerata al momento della rottura della pala per la:

- V52-850kW è pari a 31 RPM;
- V80-2,0MW è pari a 20 RPM;
- V82-1,65MW è pari a 15,84 RPM;
- V90-1,8MW è pari a 16,39 RPM;
- V90-2,0MW è pari a 16,39 RPM;
- V90-3,0MW è pari a 15,7 RPM;
- V100-1,8MW è pari a 17.4 RPM;
- V100-2,0MW è pari a 15.6 RPM;
- V100-2,6MW è pari a 14.1 RPM;
- V112-3,0MW è pari a 18.6 RPM.

5 FORZE AGENTI SULLA TRAIETTORIA PALA

Le ipotesi fatte in questo studio considerano il caso peggiore, esso avviene quando la pala si distacca dal rotore con un angolo di 45° sul piano verticale (cioè 135° azimut). La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale è molto complessa. La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala. Queste includono anche, per esempio, oltre all'impulso anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise agenti al momento del distacco. La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto). L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità. La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità. Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano. La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco. Le forze inerziali sono modellate considerando un flusso irrotazionale e stazionari.

6 CARATTERISTICHE DELLA PALA

Le caratteristiche delle pale, input della simulazione, sono riportate in tabella.

WTG type	(Outboard) Section of blade	Plan area Plane XY m ²	Plan area Plane XZ m ²	Plan area Plane YZ m ²	Mas s kg
V90-1,8MW	44	87,8 4	25,69	2,37	6660
V82-1,65MW	40	86	23,2	2,08	6200
V80-2,0MW	39	81,4 6	22,8	2,38	6300
V52-850kW	25, 3	53,8 3	14,67	1,55	1900
V90-2,0MW	44	87,8 4	25,69	2,37	6660
V90-3,0MW	44	87,8 4	25,69	2,37	6700
V100-1,8MW	49	-	-	-	7500
V100-2,0MW	49	-	-	-	7500
V100-2,6MW	49	-	-	-	7500
V112-3,0MW	54, 6	-	-	-	13500

7 CASI STUDIO

Tutte le condizioni di rottura sono state assunte avvenire quando il rotore è in posizione upwind e con una velocità del vento pari a 25m/s. Questa condizione è anch'essa conservativa in quanto dà la massima gittata fuori dal piano. Sono state calcolate tre traiettorie nelle seguenti ipotesi:

7.1 CASO 1: MOTO IRROTAZIONALE

Assenza di moti intorno agli assi XX, YY e ZZ. L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano verticale. Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- Nessuna forza di portanza agisce nella direzione in-plane;
- La massima resistenza è generata nella direzione out-of-plane;
- La resistenza nel piano agisce sulla sezione nel piano XZ.

7.2 CASO 2: MOTO IRROTAZIONALE

L'asse XX è allineato con la traiettoria. L'asse YY giace sul piano orizzontale. Quando la pala ha raggiunto questa posizione non ci sono ulteriori moti intorno agli assi XX, YY e ZZ.. In questo caso la traiettoria risultante è del tipo "a giavellotto". Questa ulteriore assunzione fa sì che questo caso sia il caso teorico peggiore ipotizzabile, in quanto definisce la condizione ideale di massima gittata. Quindi:

- La traiettoria in alto è aumentata dalla forza di portanza generata dalla pala, per cui la gittata è maggiore che in assenza di portanza.

Tre casi sono stati modellati:

- Caso 2a. L'effetto della portanza sul tempo di volo è zero. La soluzione (approssimata) per questo è data dal caso 1 solo nella direzione in-plane.
- Caso 2b. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%.
- Caso 2c. L'effetto della portanza sul tempo di volo è aumentato del 5%, in questo caso si ottiene il maggior tempo di volo.

7.3 CASO 3: MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

In questo caso si studia il moto della pala al distacco del rotore nel suo complesso considerando anche i moti di rotazione intorno agli assi XX, YY e ZZ. Questo caso è il caso più reale della traiettoria di una pala. La rotazione della pala intorno all'asse ZZ è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto. L'incidenza del vento out-of-plane sulla pala genera un momento intorno all'asse YY (centro di massa e centro aerodinamico della pala non sono coincidenti). Il vento incidente out-of-plane sulla pala genera ancora un momento intorno all'asse XX (centro di massa della sezione di pala lungo la corda non coincide con il centro aerodinamico). La resistenza della pala sia in-plane che out-of-plane è generata dalla rotazione intorno agli assi XX e YY. Per semplificare lo studio si è assunta l'area della pala pari alla stessa in direzione XY moltiplicata per il quadrato del coseno di 45°. La portanza in-plane è generata dalla rotazione intorno al piano XX. In questo caso si è assunto un aumento del 10% del tempo di volo dovuto alla portanza.

Tre casi sono stati modellati per tener conto dell'effettivo valore della resistenza:

- Caso 3a. Cd (in-plane e out-of-plane) = 0,5
- Caso 3b. Cd (in-plane e out-of-plane) = 1,0
- Caso 3c. Cd (in-plane e out-of-plane) = 1,5

8 ESPERIENZE E NOTE STATISTICHE

E' necessario enfatizzare che dal punto di vista progettuale la combinazione di coefficienti di sicurezza per i carichi, i materiali utilizzati e la valutazione delle conseguenze in caso di rottura rispettano quanto prescritto dalla norma IEC61400-1. In accordo a tale norma le pale degli aerogeneratori sono considerate "fail safe".

Questo paragrafo è stato redatto al fine di presentare alcuni degli elementi fondamentali per valutare la reale possibilità del distacco di una pala dagli aerogeneratori Vestas.

L'esperienza pratica su tutta la flotta operativa (relativa alle sole turbine considerate nel presente report) di 15679 unità ha mostrato che in caso di distacco di pala il moto è stato di tipo "rotazionale complesso" e le distanze raggiunte sono normalmente state inferiori a quelle stimate con i calcoli semplificati qui riportati.

Eventi di distacco di una sezione di pala non si sono verificati a tutt'oggi sulle turbine installate per i modelli considerati nel presente report.

Tralasciando gli incidenti dovuti a cause eccezionali (uragani, tifoni), nei successivi paragrafi sono descritti alcuni eventi e la valutazione tecnica alla base dell'analisi dei rischi sviluppata per eliminare la possibilità di reiterazione dell'incidente.

8.1 DISTACCO DI UNA DELLE PALE DAL ROTORE

Questo tipo d'incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala e il mozzo.

In occasione di tali tipi di evento, la pala ha raggiunto il terreno a una distanza inferiore ai cento metri.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma. Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

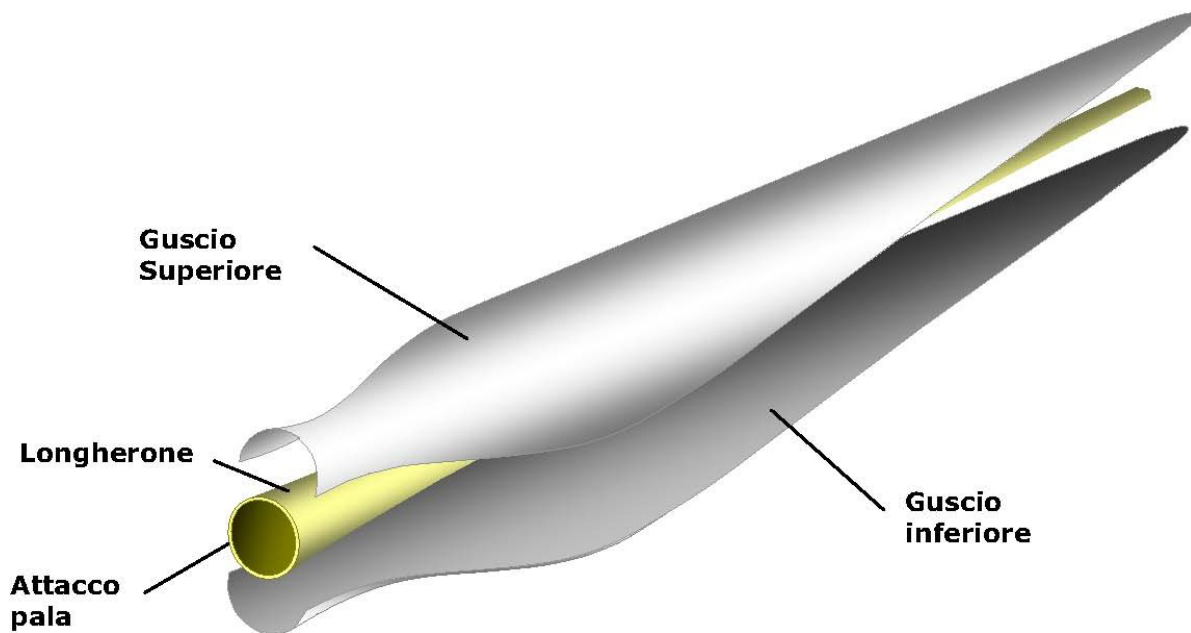


Figura 1: Schema strutturale di una pala eolica

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica e, per questo motivo, è previsto un controllo di tale serraggio durante le operazioni di manutenzione programmata della turbina.

L'evento si è manifestato a causa di incorretti interventi di manutenzione programmata cui l'aerogeneratore va sottoposto così come riportato nel manuale del costruttore: l'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono aver determinato la rottura per fatica dei prigionieri ed al distacco della pala.

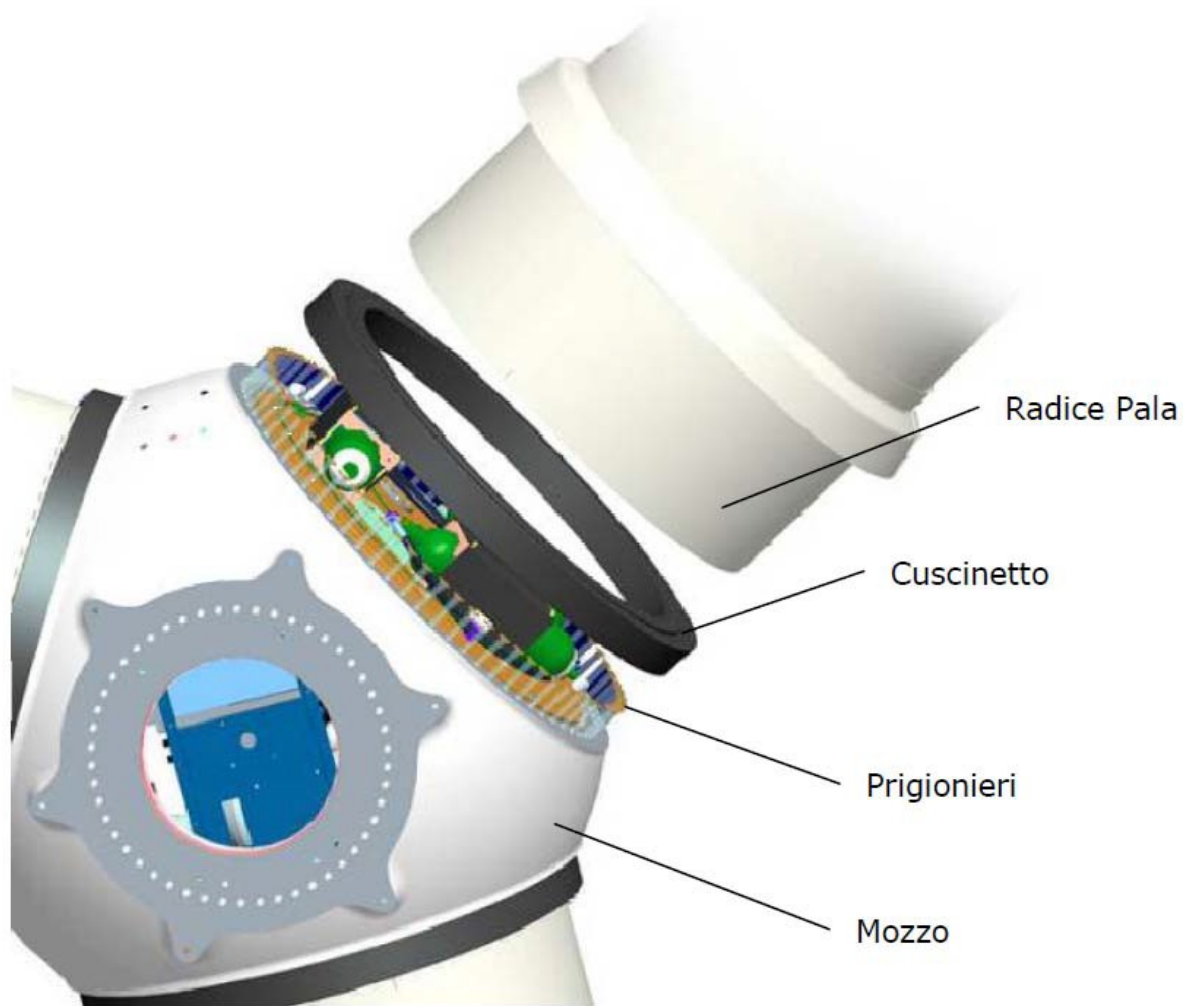


Figura 2: Dettagli dell'attacco di una pala al mozzo

8.2 ROTTURA (APERTURA) DELL'ESTREMITÀ DI PALA

Questo tipo di incidente si è quasi sempre manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte dalla Vestas sono dotate di un sistema di drenaggio della corrente di fulmine costituito da recettori metallici posti all'estremità di pala e lungo l'apertura della pala, da un cavo che collega i recettori alla radice pala e da un sistema di messa a terra. In questo modo si riesce a drenare una buona parte delle correnti indotte dalle fulminazioni atmosferiche senza danni alle pale.

In qualche caso, in cui la corrente di fulmine ha presumibilmente ecceduto i limiti progettuali (fissati dalle norme internazionali) si può manifestare un danneggiamento all'estremità di pala che si apre per la separazione dei due gusci, ma che, normalmente, non si distacca dal corpo della pala.

Eventuali residui o frammenti di guscio dovuti ad un evento ceraunico hanno dimensioni e pesi così esigui da non permettere valutazioni circa eventuali traiettorie e gittate. Queste sono comunque determinate quasi esclusivamente dal trasporto degli stessi ad opera del vento.



Figura 3: Estremità di pala danneggiata da fulminazione atmosferica

9 CONCLUSIONI

I Casi 1, 2a, 2b e 2c dimostrano che, se la traiettoria di volo è 'irrotazionale', allora la distanza raggiunta dalla pala da 25,3m (V52-850kW) sarà di circa 130m, dalla pala da 39m (V802,0MW) sarà di ca. 125 m, dalla pala da 40m (V82-1,65MW) sarà di circa 105m e da 44m (V90-1,8MW-2,0MW) sarà di ca. 117 m, dalla pala da 44m (V90-3MW) sarà di ca. 76m, dalla pala da 49m (V100-1,8MW) sarà di ca. 104m, dalla pala da 49m (V100-2,0MW) sarà di ca. 98m, dalla pala da 49m (V100-2,6MW) sarà di ca. 77,4m mentre dalla pala da 54.6m (V112 3,0 MW) sarà di ca. 147m. Il caso peggiore per la gittata è il caso 1 (2a) per il tempo invece è il 2c. Il Caso 3 mostra che, quando il flusso è rotazionale, la distanza raggiunta dalla pala sarà di ca. 99.6m per la V80-2,0MW.

Il caso reale da considerare è il caso 3 per cui si può concludere che la gittata di una pala V52-850kW (25,3m di lunghezza) è di circa 104 m, di una V80-2,0MW (39 m di lunghezza) è di ca. 99.6m, di una V82- 1,65MW sarà di ca. 82.5m, di una V90-1.8MW2,0MW (44 m di lunghezza) sarà di ca. 94m, di una V90- 3,0MW sarà di ca. 61.4m, di una V100-1,8MW sarà di ca. 83m, di una V100-2.0MW sarà di ca. 78, di una V100-2.6MW sarò di ca. 62 e di una V112-3,0MW sarà di ca. 118m (20% in meno della gittata nel caso ideale, caso 1).

Dalle note operative esposte si può concludere che ha senso effettuare un calcolo di gittata della pala intera in quanto esiste un punto di discontinuità, l'attacco bullonato che unisce la pala al mozzo, ed esiste un'ipotesi, seppur remota, sulla possibilità di cedimento di tale attacco. Mentre l'effetto di distacco di una porzione della pala è escluso, considerate le caratteristiche meccaniche della pala, ovvero, una struttura monolitica della trave di sostegno che rimane vincolata al mozzo attraverso una collegamento bullonato.

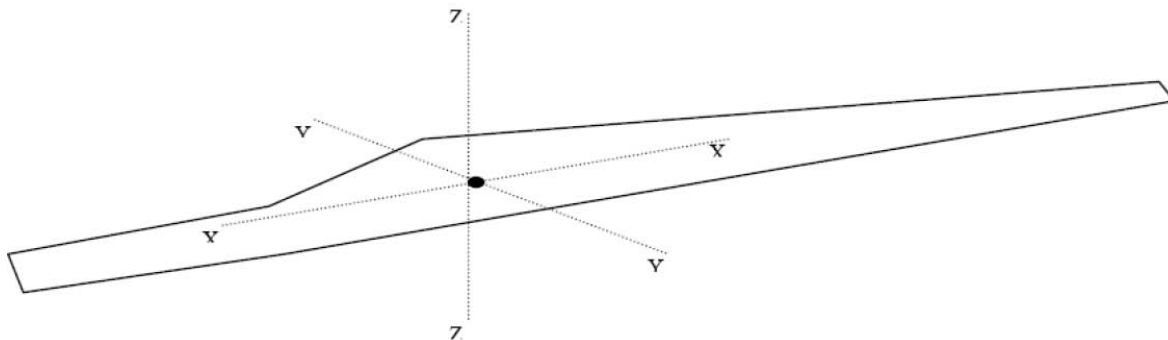


Figura 4: Sistema di coordinate usato per la pala (YY – Flapwise; XX – Pitchwise; ZZ – Edgewise)

10 RIFERIMENTI

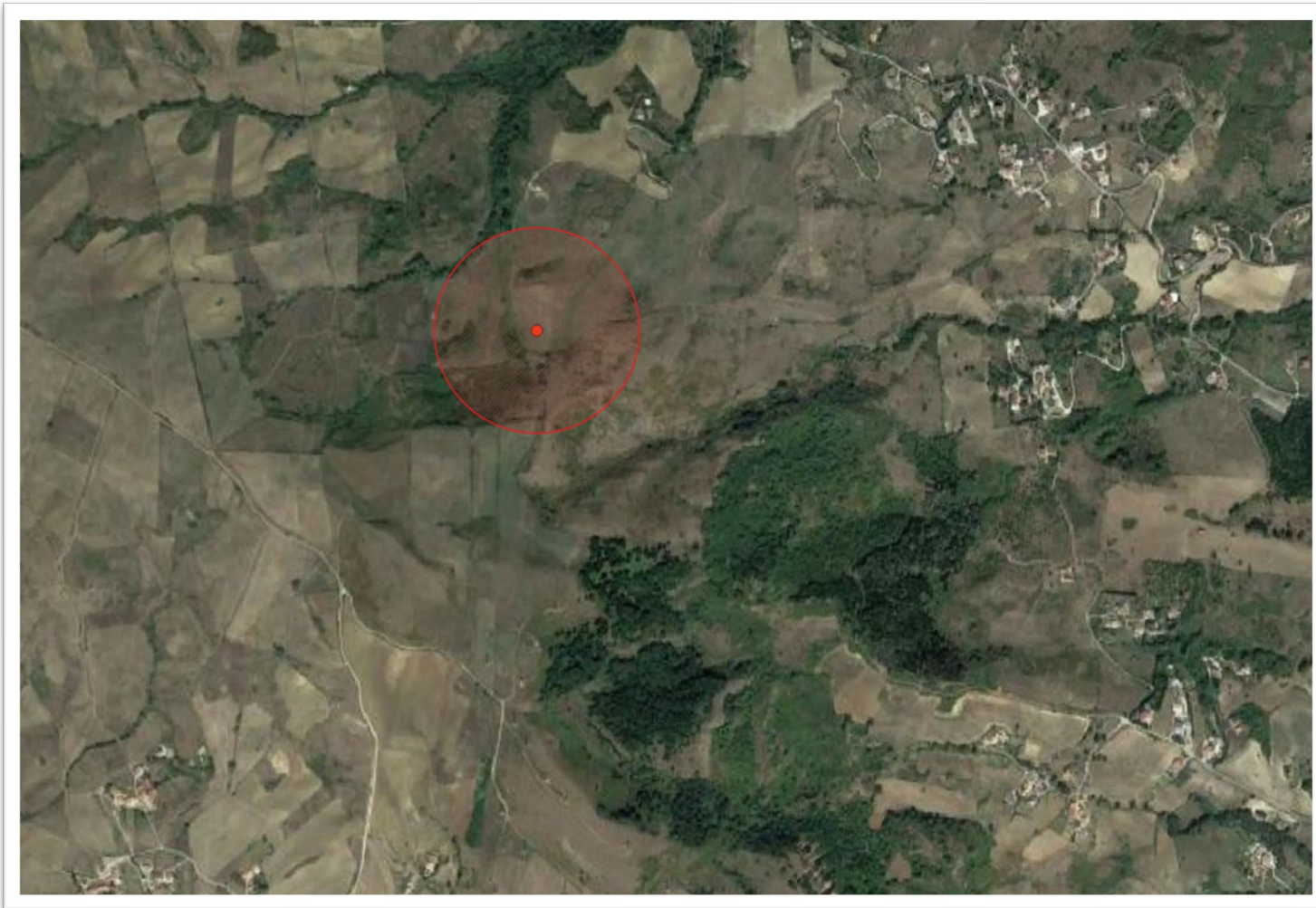
"Blade throw calculation under normal operating conditions" VESTAS AS Denmark July 2001

11 APPENDICE

Caso 3	Pala V80 2,0M W	Pala V90 1,8M W	Pala V82 1,65M W	Pala V52 850k W	Pala V90 2,0M W	Pala V90 3,0M W	Pala V10 0 1,8M W	Pala V10 0 2,0M W	Pala V10 0 2,6M W	Pala V11 2 3,0M W
Velocità di rotazione	20	16,39	15,84	31	16,39	15,7	17,4	15,6	14,1	18,4
Tempo di volo	7,6	7,76	6,27	7,63	7,76	6,84	6,7	7	6	7,7
Distanza Vettoriale	99,6	94	82,5	104	94	61,4	83	78	62	118

Gli altri casi sono stati studiati solo per la V80-2,0MW quindi non sono rilevanti per il caso in questione.

ALLEGATO 2 STRALCI CARTOGRAFICI SU ORTOFOTO CON INDICAZIONE DI UN BUFFER DI 210 METRI INTORNO A CIASCUNA WTG DI PROGETTO



Buffer di 210m dalla WTG N.1 – Nessun ostacolo presente



Buffer di 210m dalla WTG N.2 – Nessun ostacolo presente



Buffer di 210m dalla WTG N.3 – Nessun ostacolo presente



Buffer di 210m dalla WTG N.4 – Nessun ostacolo presente



Buffer di 210m dalla WTG N.5 – Nessun ostacolo presente

ALLEGATO 3 CALCOLO DI GITTATA MASSIMA

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
18	8.83	83.50	115.00	27.12	8.38	25.80	124.06	170	29.33	9.81	41.71	27.90	55.67	97.38
19	8.83	83.50	115.00	27.12	8.83	25.65	124.55	170	29.33	9.81	45.48	27.74	55.67	101.15
20	8.83	83.50	115.00	27.12	9.28	25.49	125.03	170	29.33	9.81	49.21	27.56	55.67	104.88
21	8.83	83.50	115.00	27.12	9.72	25.32	125.51	170	29.33	9.81	52.91	27.39	55.67	108.57
22	8.83	83.50	115.00	27.12	10.16	25.15	125.99	170	29.33	9.81	56.56	27.20	55.67	112.23
23	8.83	83.50	115.00	27.12	10.60	24.97	126.46	170	29.33	9.81	60.17	27.00	55.67	115.83
24	8.83	83.50	115.00	27.12	11.03	24.78	126.93	170	29.33	9.81	63.73	26.80	55.67	119.39
25	8.83	83.50	115.00	27.12	11.46	24.58	127.40	170	29.33	9.81	67.24	26.59	55.67	122.91
26	8.83	83.50	115.00	27.12	11.89	24.38	127.86	170	29.33	9.81	70.70	26.36	55.67	126.37
27	8.83	83.50	115.00	27.12	12.31	24.17	128.32	170	29.33	9.81	74.11	26.14	55.67	129.77
28	8.83	83.50	115.00	27.12	12.73	23.95	128.77	170	29.33	9.81	77.46	25.90	55.67	133.13
29	8.83	83.50	115.00	27.12	13.15	23.72	129.22	170	29.33	9.81	80.75	25.66	55.67	136.42
30	8.83	83.50	115.00	27.12	13.56	23.49	129.67	170	29.33	9.81	83.99	25.40	55.67	139.66
31	8.83	83.50	115.00	27.12	13.97	23.25	130.11	170	29.33	9.81	87.17	25.14	55.67	142.83
32	8.83	83.50	115.00	27.12	14.37	23.00	130.54	170	29.33	9.81	90.28	24.88	55.67	145.94
33	8.83	83.50	115.00	27.12	14.77	22.75	130.98	170	29.33	9.81	93.33	24.60	55.67	148.99
34	8.83	83.50	115.00	27.12	15.17	22.49	131.40	170	29.33	9.81	96.31	24.32	55.67	151.97
35	8.83	83.50	115.00	27.12	15.56	22.22	131.82	170	29.33	9.81	99.22	24.03	55.67	154.89
36	8.83	83.50	115.00	27.12	15.94	21.94	132.24	170	29.33	9.81	102.07	23.73	55.67	157.73
37	8.83	83.50	115.00	27.12	16.32	21.66	132.65	170	29.33	9.81	104.84	23.43	55.67	160.51
38	8.83	83.50	115.00	27.12	16.70	21.37	133.06	170	29.33	9.81	107.55	23.11	55.67	163.21
39	8.83	83.50	115.00	27.12	17.07	21.08	133.46	170	29.33	9.81	110.18	22.80	55.67	165.85
40	8.83	83.50	115.00	27.12	17.43	20.78	133.86	170	29.33	9.81	112.74	22.47	55.67	168.40
41	8.83	83.50	115.00	27.12	17.79	20.47	134.24	170	29.33	9.81	115.22	22.14	55.67	170.89
42	8.83	83.50	115.00	27.12	18.15	20.16	134.63	170	29.33	9.81	117.63	21.80	55.67	173.30

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
0	8.83	83.50	115.00	27.12	0.00	27.12	115.00	170	29.33	9.81	-29.33	29.33	55.67	26.33
1	8.83	83.50	115.00	27.12	0.47	27.12	115.51	170	29.33	9.81	-25.38	29.33	55.67	30.29
2	8.83	83.50	115.00	27.12	0.95	27.11	116.02	170	29.33	9.81	-21.40	29.32	55.67	34.26
3	8.83	83.50	115.00	27.12	1.42	27.09	116.54	170	29.33	9.81	-17.42	29.29	55.67	38.25
4	8.83	83.50	115.00	27.12	1.89	27.06	117.05	170	29.33	9.81	-13.43	29.26	55.67	42.24
5	8.83	83.50	115.00	27.12	2.36	27.02	117.56	170	29.33	9.81	-9.43	29.22	55.67	46.24
6	8.83	83.50	115.00	27.12	2.84	26.98	118.07	170	29.33	9.81	-5.43	29.17	55.67	50.24
7	8.83	83.50	115.00	27.12	3.31	26.92	118.57	170	29.33	9.81	-1.43	29.11	55.67	54.24
8	8.83	83.50	115.00	27.12	3.77	26.86	119.08	170	29.33	9.81	2.57	29.05	55.67	58.23
9	8.83	83.50	115.00	27.12	4.24	26.79	119.59	170	29.33	9.81	6.56	28.97	55.67	62.22
10	8.83	83.50	115.00	27.12	4.71	26.71	120.09	170	29.33	9.81	10.54	28.89	55.67	66.21
11	8.83	83.50	115.00	27.12	5.18	26.63	120.60	170	29.33	9.81	14.51	28.79	55.67	70.17
12	8.83	83.50	115.00	27.12	5.64	26.53	121.10	170	29.33	9.81	18.46	28.69	55.67	74.13
13	8.83	83.50	115.00	27.12	6.10	26.43	121.60	170	29.33	9.81	22.40	28.58	55.67	78.06
14	8.83	83.50	115.00	27.12	6.56	26.32	122.10	170	29.33	9.81	26.31	28.46	55.67	81.98
15	8.83	83.50	115.00	27.12	7.02	26.20	122.59	170	29.33	9.81	30.21	28.33	55.67	85.87
16	8.83	83.50	115.00	27.12	7.48	26.07	123.09	170	29.33	9.81	34.07	28.20	55.67	89.74
17	8.83	83.50	115.00	27.12	7.93	25.94	123.58	170	29.33	9.81	37.91	28.05	55.67	93.57
43	8.83	83.50	115.00	27.12	18.50	19.84	135.01	170	29.33	9.81	119.96	21.45	55.67	175.63
44	8.83	83.50	115.00	27.12	18.84	19.51	135.38	170	29.33	9.81	122.22	21.10	55.67	177.88
45	8.83	83.50	115.00	27.12	19.18	19.18	135.74	170	29.33	9.81	124.39	20.74	55.67	180.06
46	8.83	83.50	115.00	27.12	19.51	18.84	136.10	170	29.33	9.81	126.49	20.38	55.67	182.16

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
47	8.83	83.50	115.00	27.12	19.84	18.50	136.45	170	29.33	9.81	128.52	20.01	55.67	184.18
48	8.83	83.50	115.00	27.12	20.16	18.15	136.80	170	29.33	9.81	130.46	19.63	55.67	186.12
49	8.83	83.50	115.00	27.12	20.47	17.79	137.14	170	29.33	9.81	132.32	19.24	55.67	187.99
50	8.83	83.50	115.00	27.12	20.78	17.43	137.47	170	29.33	9.81	134.11	18.86	55.67	189.77
51	8.83	83.50	115.00	27.12	21.08	17.07	137.80	170	29.33	9.81	135.81	18.46	55.67	191.48
52	8.83	83.50	115.00	27.12	21.37	16.70	138.11	170	29.33	9.81	137.44	18.06	55.67	193.10
53	8.83	83.50	115.00	27.12	21.66	16.32	138.43	170	29.33	9.81	138.98	17.65	55.67	194.65
54	8.83	83.50	115.00	27.12	21.94	15.94	138.73	170	29.33	9.81	140.45	17.24	55.67	196.12
55	8.83	83.50	115.00	27.12	22.22	15.56	139.03	170	29.33	9.81	141.84	16.82	55.67	197.50
56	8.83	83.50	115.00	27.12	22.49	15.17	139.32	170	29.33	9.81	143.15	16.40	55.67	198.81
57	8.83	83.50	115.00	27.12	22.75	14.77	139.60	170	29.33	9.81	144.38	15.98	55.67	200.05
58	8.83	83.50	115.00	27.12	23.00	14.37	139.88	170	29.33	9.81	145.53	15.54	55.67	201.20
59	8.83	83.50	115.00	27.12	23.25	13.97	140.14	170	29.33	9.81	146.61	15.11	55.67	202.28
60	8.83	83.50	115.00	27.12	23.49	13.56	140.40	170	29.33	9.81	147.61	14.67	55.67	203.28
61	8.83	83.50	115.00	27.12	23.72	13.15	140.66	170	29.33	9.81	148.53	14.22	55.67	204.20
62	8.83	83.50	115.00	27.12	23.95	12.73	140.90	170	29.33	9.81	149.38	13.77	55.67	205.05
63	8.83	83.50	115.00	27.12	24.17	12.31	141.14	170	29.33	9.81	150.16	13.32	55.67	205.83
64	8.83	83.50	115.00	27.12	24.38	11.89	141.36	170	29.33	9.81	150.86	12.86	55.67	206.53
65	8.83	83.50	115.00	27.12	24.58	11.46	141.59	170	29.33	9.81	151.49	12.40	55.67	207.16
66	8.83	83.50	115.00	27.12	24.78	11.03	141.80	170	29.33	9.81	152.05	11.93	55.67	207.71
67	8.83	83.50	115.00	27.12	24.97	10.60	142.00	170	29.33	9.81	152.53	11.46	55.67	208.20
68	8.83	83.50	115.00	27.12	25.15	10.16	142.20	170	29.33	9.81	152.95	10.99	55.67	208.62
69	8.83	83.50	115.00	27.12	25.32	9.72	142.39	170	29.33	9.81	153.30	10.51	55.67	208.96
70	8.83	83.50	115.00	27.12	25.49	9.28	142.56	170	29.33	9.81	153.58	10.03	55.67	209.25
71	8.83	83.50	115.00	27.12	25.65	8.83	142.74	170	29.33	9.81	153.79	9.55	55.67	209.46
72	8.83	83.50	115.00	27.12	25.80	8.38	142.90	170	29.33	9.81	153.95	9.06	55.67	209.61
73	8.83	83.50	115.00	27.12	25.94	7.93	143.05	170	29.33	9.81	154.03	8.58	55.67	209.70
74	8.83	83.50	115.00	27.12	26.07	7.48	143.20	170	29.33	9.81	154.06	8.09	55.67	209.72
75	8.83	83.50	115.00	27.12	26.20	7.02	143.33	170	29.33	9.81	154.02	7.59	55.67	209.69

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
76	8.83	83.50	115.00	27.12	26.32	6.56	143.46	170	29.33	9.81	153.92	7.10	55.67	209.59
77	8.83	83.50	115.00	27.12	26.43	6.10	143.58	170	29.33	9.81	153.77	6.60	55.67	209.44
78	8.83	83.50	115.00	27.12	26.53	5.64	143.69	170	29.33	9.81	153.56	6.10	55.67	209.23
79	8.83	83.50	115.00	27.12	26.63	5.18	143.79	170	29.33	9.81	153.29	5.60	55.67	208.96
80	8.83	83.50	115.00	27.12	26.71	4.71	143.89	170	29.33	9.81	152.97	5.09	55.67	208.64
81	8.83	83.50	115.00	27.12	26.79	4.24	143.97	170	29.33	9.81	152.60	4.59	55.67	208.27
82	8.83	83.50	115.00	27.12	26.86	3.77	144.05	170	29.33	9.81	152.18	4.08	55.67	207.84
83	8.83	83.50	115.00	27.12	26.92	3.31	144.11	170	29.33	9.81	151.71	3.57	55.67	207.37
84	8.83	83.50	115.00	27.12	26.98	2.84	144.17	170	29.33	9.81	151.18	3.07	55.67	206.85
85	8.83	83.50	115.00	27.12	27.02	2.36	144.22	170	29.33	9.81	150.62	2.56	55.67	206.28
86	8.83	83.50	115.00	27.12	27.06	1.89	144.26	170	29.33	9.81	150.00	2.05	55.67	205.67
87	8.83	83.50	115.00	27.12	27.09	1.42	144.29	170	29.33	9.81	149.35	1.54	55.67	205.02
88	8.83	83.50	115.00	27.12	27.11	0.95	144.32	170	29.33	9.81	148.65	1.02	55.67	204.32
89	8.83	83.50	115.00	27.12	27.12	0.47	144.33	170	29.33	9.81	147.91	0.51	55.67	203.58
90	8.83	83.50	115.00	27.12	27.12	0.00	144.33	170	29.33	9.81	147.13	0.00	55.67	202.80

Per un angolo compreso tra 270° e 360° il valore della gittata sarà negativo perché verso sinistra														
Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
270	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.12	0.00	85.67	170	29.33	9.81	-113.35	0.00	55.67	-169.02
271	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.12	0.47	85.67	170	29.33	9.81	-115.17	0.51	55.67	-170.83
272	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.11	0.95	85.68	170	29.33	9.81	-116.97	1.02	55.67	-172.63
273	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.09	1.42	85.71	170	29.33	9.81	-118.75	1.54	55.67	-174.41
274	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.06	1.89	85.74	170	29.33	9.81	-120.51	2.05	55.67	-176.18
275	8.83	83.50	115.00	27.12	-27.02	2.36	85.78	170	29.33	9.81	-122.25	2.56	55.67	-177.92
276	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.98	2.84	85.83	170	29.33	9.81	-123.97	3.07	55.67	-179.64
277	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.92	3.31	85.89	170	29.33	9.81	-125.66	3.57	55.67	-181.33
278	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.86	3.77	85.95	170	29.33	9.81	-127.33	4.08	55.67	-183.00

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
279	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.79	4.24	86.03	170	29.33	9.81	-128.97	4.59	55.67	-184.63
280	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.71	4.71	86.11	170	29.33	9.81	-130.57	5.09	55.67	-186.24
281	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.63	5.18	86.21	170	29.33	9.81	-132.15	5.60	55.67	-187.81
282	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.53	5.64	86.31	170	29.33	9.81	-133.68	6.10	55.67	-189.35
283	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.43	6.10	86.42	170	29.33	9.81	-135.18	6.60	55.67	-190.85
284	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.32	6.56	86.54	170	29.33	9.81	-136.64	7.10	55.67	-192.30
285	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.20	7.02	86.67	170	29.33	9.81	-138.05	7.59	55.67	-193.72
286	8.83	83.50	115.00	27.12	-26.07	7.48	86.80	170	29.33	9.81	-139.42	8.09	55.67	-195.09
287	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.94	7.93	86.95	170	29.33	9.81	-140.75	8.58	55.67	-196.41
288	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.80	8.38	87.10	170	29.33	9.81	-142.02	9.06	55.67	-197.69
289	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.65	8.83	87.26	170	29.33	9.81	-143.25	9.55	55.67	-198.91
290	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.49	9.28	87.44	170	29.33	9.81	-144.41	10.03	55.67	-200.08
291	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.32	9.72	87.61	170	29.33	9.81	-145.53	10.51	55.67	-201.19
292	8.83	83.50	115.00	27.12	-25.15	10.16	87.80	170	29.33	9.81	-146.58	10.99	55.67	-202.25
293	8.83	83.50	115.00	27.12	-24.97	10.60	88.00	170	29.33	9.81	-147.57	11.46	55.67	-203.24
294	8.83	83.50	115.00	27.12	-24.78	11.03	88.20	170	29.33	9.81	-148.50	11.93	55.67	-204.17
295	8.83	83.50	115.00	27.12	-24.58	11.46	88.41	170	29.33	9.81	-149.37	12.40	55.67	-205.04
296	8.83	83.50	115.00	27.12	-24.38	11.89	88.64	170	29.33	9.81	-150.17	12.86	55.67	-205.84
297	8.83	83.50	115.00	27.12	-24.17	12.31	88.86	170	29.33	9.81	-150.90	13.32	55.67	-206.57
298	8.83	83.50	115.00	27.12	-23.95	12.73	89.10	170	29.33	9.81	-151.56	13.77	55.67	-207.23
299	8.83	83.50	115.00	27.12	-23.72	13.15	89.34	170	29.33	9.81	-152.14	14.22	55.67	-207.81
300	8.83	83.50	115.00	27.12	-23.49	13.56	89.60	170	29.33	9.81	-152.66	14.67	55.67	-208.32
301	8.83	83.50	115.00	27.12	-23.25	13.97	89.86	170	29.33	9.81	-153.09	15.11	55.67	-208.76
302	8.83	83.50	115.00	27.12	-23.00	14.37	90.12	170	29.33	9.81	-153.45	15.54	55.67	-209.11
303	8.83	83.50	115.00	27.12	-22.75	14.77	90.40	170	29.33	9.81	-153.72	15.98	55.67	-209.39
304	8.83	83.50	115.00	27.12	-22.49	15.17	90.68	170	29.33	9.81	-153.92	16.40	55.67	-209.58
305	8.83	83.50	115.00	27.12	-22.22	15.56	90.97	170	29.33	9.81	-154.03	16.82	55.67	-209.70
306	8.83	83.50	115.00	27.12	-21.94	15.94	91.27	170	29.33	9.81	-154.06	17.24	55.67	-209.72
307	8.83	83.50	115.00	27.12	-21.66	16.32	91.57	170	29.33	9.81	-154.00	17.65	55.67	-209.66

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
308	8.83	83.50	115.00	27.12	-21.37	16.70	91.89	170	29.33	9.81	-153.85	18.06	55.67	-209.52
309	8.83	83.50	115.00	27.12	-21.08	17.07	92.20	170	29.33	9.81	-153.62	18.46	55.67	-209.28
310	8.83	83.50	115.00	27.12	-20.78	17.43	92.53	170	29.33	9.81	-153.29	18.86	55.67	-208.96
311	8.83	83.50	115.00	27.12	-20.47	17.79	92.86	170	29.33	9.81	-152.88	19.24	55.67	-208.54
312	8.83	83.50	115.00	27.12	-20.16	18.15	93.20	170	29.33	9.81	-152.37	19.63	55.67	-208.04
313	8.83	83.50	115.00	27.12	-19.84	18.50	93.55	170	29.33	9.81	-151.77	20.01	55.67	-207.44
314	8.83	83.50	115.00	27.12	-19.51	18.84	93.90	170	29.33	9.81	-151.08	20.38	55.67	-206.75
315	8.83	83.50	115.00	27.12	-19.18	19.18	94.26	170	29.33	9.81	-150.30	20.74	55.67	-205.97
316	8.83	83.50	115.00	27.12	-18.84	19.51	94.62	170	29.33	9.81	-149.42	21.10	55.67	-205.09
317	8.83	83.50	115.00	27.12	-18.50	19.84	94.99	170	29.33	9.81	-148.45	21.45	55.67	-204.12
318	8.83	83.50	115.00	27.12	-18.15	20.16	95.37	170	29.33	9.81	-147.38	21.80	55.67	-203.05
319	8.83	83.50	115.00	27.12	-17.79	20.47	95.76	170	29.33	9.81	-146.22	22.14	55.67	-201.89
320	8.83	83.50	115.00	27.12	-17.43	20.78	96.14	170	29.33	9.81	-144.97	22.47	55.67	-200.63
321	8.83	83.50	115.00	27.12	-17.07	21.08	96.54	170	29.33	9.81	-143.62	22.80	55.67	-199.28
322	8.83	83.50	115.00	27.12	-16.70	21.37	96.94	170	29.33	9.81	-142.17	23.11	55.67	-197.84
323	8.83	83.50	115.00	27.12	-16.32	21.66	97.35	170	29.33	9.81	-140.63	23.43	55.67	-196.30
324	8.83	83.50	115.00	27.12	-15.94	21.94	97.76	170	29.33	9.81	-139.00	23.73	55.67	-194.67
325	8.83	83.50	115.00	27.12	-15.56	22.22	98.18	170	29.33	9.81	-137.28	24.03	55.67	-192.94
326	8.83	83.50	115.00	27.12	-15.17	22.49	98.60	170	29.33	9.81	-135.46	24.32	55.67	-191.13
327	8.83	83.50	115.00	27.12	-14.77	22.75	99.02	170	29.33	9.81	-133.55	24.60	55.67	-189.22
328	8.83	83.50	115.00	27.12	-14.37	23.00	99.46	170	29.33	9.81	-131.55	24.88	55.67	-187.22
329	8.83	83.50	115.00	27.12	-13.97	23.25	99.89	170	29.33	9.81	-129.46	25.14	55.67	-185.13
330	8.83	83.50	115.00	27.12	-13.56	23.49	100.33	170	29.33	9.81	-127.28	25.40	55.67	-182.95
331	8.83	83.50	115.00	27.12	-13.15	23.72	100.78	170	29.33	9.81	-125.01	25.66	55.67	-180.68
332	8.83	83.50	115.00	27.12	-12.73	23.95	101.23	170	29.33	9.81	-122.66	25.90	55.67	-178.33
333	8.83	83.50	115.00	27.12	-12.31	24.17	101.68	170	29.33	9.81	-120.22	26.14	55.67	-175.89
334	8.83	83.50	115.00	27.12	-11.89	24.38	102.14	170	29.33	9.81	-117.70	26.36	55.67	-173.36
335	8.83	83.50	115.00	27.12	-11.46	24.58	102.60	170	29.33	9.81	-115.09	26.59	55.67	-170.76
336	8.83	83.50	115.00	27.12	-11.03	24.78	103.07	170	29.33	9.81	-112.40	26.80	55.67	-168.07

Angolo α	n	L	H _{torre}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _g	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
337	8.83	83.50	115.00	27.12	-10.60	24.97	103.54	170	29.33	9.81	-109.64	27.00	55.67	-165.31
338	8.83	83.50	115.00	27.12	-10.16	25.15	104.01	170	29.33	9.81	-106.80	27.20	55.67	-162.46
339	8.83	83.50	115.00	27.12	-9.72	25.32	104.49	170	29.33	9.81	-103.88	27.39	55.67	-159.55
340	8.83	83.50	115.00	27.12	-9.28	25.49	104.97	170	29.33	9.81	-100.89	27.56	55.67	-156.55
341	8.83	83.50	115.00	27.12	-8.83	25.65	105.45	170	29.33	9.81	-97.83	27.74	55.67	-153.49
342	8.83	83.50	115.00	27.12	-8.38	25.80	105.94	170	29.33	9.81	-94.69	27.90	55.67	-150.36
343	8.83	83.50	115.00	27.12	-7.93	25.94	106.42	170	29.33	9.81	-91.50	28.05	55.67	-147.16
344	8.83	83.50	115.00	27.12	-7.48	26.07	106.91	170	29.33	9.81	-88.23	28.20	55.67	-143.90
345	8.83	83.50	115.00	27.12	-7.02	26.20	107.41	170	29.33	9.81	-84.91	28.33	55.67	-140.57
346	8.83	83.50	115.00	27.12	-6.56	26.32	107.90	170	29.33	9.81	-81.52	28.46	55.67	-137.19
347	8.83	83.50	115.00	27.12	-6.10	26.43	108.40	170	29.33	9.81	-78.08	28.58	55.67	-133.75
348	8.83	83.50	115.00	27.12	-5.64	26.53	108.90	170	29.33	9.81	-74.58	28.69	55.67	-130.25
349	8.83	83.50	115.00	27.12	-5.18	26.63	109.40	170	29.33	9.81	-71.03	28.79	55.67	-126.70
350	8.83	83.50	115.00	27.12	-4.71	26.71	109.91	170	29.33	9.81	-67.43	28.89	55.67	-123.10
351	8.83	83.50	115.00	27.12	-4.24	26.79	110.41	170	29.33	9.81	-63.79	28.97	55.67	-119.45
352	8.83	83.50	115.00	27.12	-3.77	26.86	110.92	170	29.33	9.81	-60.10	29.05	55.67	-115.76
353	8.83	83.50	115.00	27.12	-3.31	26.92	111.43	170	29.33	9.81	-56.37	29.11	55.67	-112.03
354	8.83	83.50	115.00	27.12	-2.84	26.98	111.93	170	29.33	9.81	-52.60	29.17	55.67	-108.26
355	8.83	83.50	115.00	27.12	-2.36	27.02	112.44	170	29.33	9.81	-48.79	29.22	55.67	-104.46
356	8.83	83.50	115.00	27.12	-1.89	27.06	112.95	170	29.33	9.81	-44.95	29.26	55.67	-100.62
357	8.83	83.50	115.00	27.12	-1.42	27.09	113.46	170	29.33	9.81	-41.09	29.29	55.67	-96.75
358	8.83	83.50	115.00	27.12	-0.95	27.11	113.98	170	29.33	9.81	-37.19	29.32	55.67	-92.86
359	8.83	83.50	115.00	27.12	-0.47	27.12	114.49	170	29.33	9.81	-33.27	29.33	55.67	-88.94
360	8.83	83.50	115.00	27.12	0.00	27.12	115.00	170	29.33	9.81	-29.33	29.33	55.67	-85.00