

COMUNI DI BELCASTRO E CUTRO

Provincia di Catanzaro e Crotone



Progetto parco eolico "Cantorato"

Elaborato: CA_ Integrazioni	DISTACCO ORGANI ROTANTI Vestas - V172
Scala: Documento	
Data: 18.07.2024	

Committente:
Energia Levante S.r.l.

Il Progettista
Ferraro architetto Francesco



Società del gruppo:

N°REVISIONE	Data revisione	Elaborato	Controllato	Approvato	Note
1			F.F.	G.M.	

E' vietata la copia anche parziale del presente elaborato

ENERGIA LEVANTE S.r.l.

Via Luca Gaurico n°9/11 – Regus Eur 4° piano – Cap. 00143 ROMA (Italia)
P.IVA 10240591007- REA RM1219825 – PEC: energialevantesrl@legalmail.it
Indirizzo email: www.sserenewables.com – Telefono (+39) 0654832107

Sommario

1.	INTRODUZIONE	2
2.	DESCRIZIONE TECNICA GENERALE DEL PROGETTO	2
3.	AEROGENERATORE.....	2
4.	RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE	5
5.	GITTATA – ANALISI TEORICA	5
6.	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO.....	7
7.	CALCOLO DELLA GITTATA	9
8.	CONCLUSIONI	12

1. INTRODUZIONE

La presente relazione tecnica è riferita all’impianto eolico da ubicarsi in Calabria, nei territori dei Comuni di: Cutro e Belcastro per la valutazione della gittata massima di elementi rotanti in caso di danneggiamento.

2. DESCRIZIONE TECNICA GENERALE DEL PROGETTO

L’impianto eolico in oggetto risulta costituito da n. 20 aerogeneratori Vestas V172 aventi potenza nominale da 6.2 a 7,2 MW/cad per una potenza complessiva di 124MW.

Oltre agli aerogeneratori ed alle opere strettamente necessarie, quali viabilità di accesso e piazzole di montaggio/stoccaggio, il progetto prevede la realizzazione di:

elettrodotto interrato di media tensione a 30kV;

cabine di raccolta linee;

Sottostazione Elettrica di trasformazione MT/AT

30/150 kV (SSE) e opera di rete SE TERNA;

Opere di rete comprendenti uno stallo condiviso con altri produttori per il collegamento alla Stazione Elettrica di trasformazione 380/150kV in entrata sulla linea 380 kV “Scandale” come da Soluzione tecnica minima rilasciata dall’ente gestore TERNA S.p.a.

3. AEROGENERATORE

Gli aerogeneratori in progetto si compongono dei seguenti elementi: struttura di fondazione; torre di sostegno composta da trami in acciaio, mozzo, tre lame, rotore, moltiplicatore di giri, generatore, sistemi di controllo ed orientamento, navicella, trasformatore, componentistica elettrica, impianto di messa a terra.

La torre di sostegno è del tipo tubolare con unioni bullonate, idoneamente ancorata alla struttura di fondazione.

All'estremità superiore sarà collegata, tramite idonea bullonatura, la navicella contenente gli elementi tecnologici necessaria alla conversione dell'energia, il rotore (collegato all'albero di trasmissione) e le lame (o pale) per la captazione del vento.

In ogni aerogeneratore, all'interno della navicella e della torre di sostegno, sono contenute tutte le apparecchiature di bassa tensione (raddrizzatori, inverter, quadro di comando e controllo aerogeneratore) e di media tensione (trasformatore BT/MT, quadro MT di sezionamento e protezione). Dal generatore elettrico posto all'interno della navicella, i cavi trasportano l'energia elettrica prodotta al trasformatore BT/MT in cui avviene l'elevazione ad una tensione di 30 kV, immessa nei cavi interrati al fine di trasportarla verso la cabina di raccolta e, successivamente, alla sottostazione di trasformazione 30/150kV che sarà posta nelle vicinanze della nuova stazione RTN 380/150kV “Cutro” nel commune di Scandale.

Ogni aerogeneratore ha i seguenti dati geometrici, meccanici ed elettrici.

Modello tipo Vestas V172	
Altezza mozzo dal piano campagna (Hub)	114 [m]
Lunghezza lame	84,35 [m]
Diametro del rotore	172 [m]
Velocità di cut-off	25 [m/s]
Potenza nominale	7,2 [MW]

Il rotore è costituito da tre lame e sarà fissato sul mozzo della navicella a sua volta installata sulla torre in acciaio tubolare.

La potenza in uscita sarà controllata dalla regolazione della domanda di passo e coppia. La velocità del rotore è variabile ed è progettata per massimizzare la potenza erogata.

Le lame sono costituite da infusione di fibra di vetro e stampaggio di componenti in pultruso di carbonio. La struttura della pala utilizza gusci aerodinamici contenenti copri-longheroni incorporati, incollati a due

principali nastri di taglio epossì-fibra di vetrobalsa/schiuma.

Il mozzo del rotore è fuso in ghisa sferoidale ed è fissato all'albero a bassa velocità della trasmissione con una connessione a flangia.

La turbina eolica è montata di serie su una torre tubolare rastremata in acciaio dotata di salita interna.

4. RISCHIO DI ROTTURA ACCIDENTALE

La rottura accidentale di un elemento rotante (la pala) di un aerogeneratore ad asse orizzontale può essere considerato un evento raro, in considerazione della tecnologia costruttiva ed ai materiali impiegati per la realizzazione delle pale stesse. Tuttavia, 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.

Il rischio è considerato in questo contesto come combinazione di due fattori:

- la probabilità che possa accadere un determinato evento;
- la probabilità che tale evento abbia conseguenze sfavorevoli.

Durante il funzionamento dell'impianto, il più grande rischio è dovuto alla caduta di oggetti dall'alto, queste cadute possono essere dovute:

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

Per ciò che concerne la prima tipologia di evento, vista la latitudine dell'area di progetto e le caratteristiche climatiche, la sua probabilità si può considerare trascurabile.

Per ciò che riguarda la seconda tipologia è bene evidenziare che:

- il collegamento rigido tra le pale ed il mozzo limita sino a quasi ad annullare il rischio di distacco di una pala;
- le pale dei rotori di progetto sono realizzate in fibra di vetro e carbonio 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 meccaniche 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);

- gli aerogeneratori sono dotati di un sistema di supervisione e controllo pale. Il sistema di controllo è basato su un sistema multiprocessore, che gestisce automaticamente tutte le funzioni della turbina come l'avvio, l'arresto, la produzione, la disponibilità dei sottosistemi. Questo sistema consente anche il controllo a distanza dell'aerogeneratore. Il sistema di protezione è un sistema cablato completamente autonomo, capace di arrestare la turbina in qualunque situazione di emergenza, escludendo danni al sistema e mantenendo i carichi al di sotto dei limiti di progetto;
- gli aerogeneratori di grande taglia del tipo previsto in progetto, in considerazione anche del loro elevato valore commerciale, sono oggetto di programmi di manutenzione molto accurati che per quanto riguarda le pale è atto a verificare l'esistenza di piccole fratture, di cui se accertata la pericolosità determinano interventi di manutenzione ordinaria (riparazioni) o straordinaria (sostituzione del pezzo);

La statistica riporta fra le maggiori cause di danno quelle prodotte direttamente o indirettamente dalle fulminazioni. Proprio per questo motivo il sistema navicella-rotore-torre tubolare sarà protetto con parafulmini. In conformità a quanto previsto dalla norma CEI 81-1 la classe di protezione sarà quella più alta (Classe I). In termini probabilistici ciò significa un livello di protezione del 98% (il 2% di probabilità che a fulminazione avvenuta si abbiano danni al sistema).

Pertanto può affermarsi che la probabilità che si produca un danno al sistema con successivi incidenti è molto limitata se non addirittura nulla.

5. GITTATA – ANALISI TEORICA

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distaccamento in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a “giavellotto” del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavellotto è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni resistive del vento ed il moto di rotazione complesso

dovuto al profilo aerodinamico della pala/frammento-di-pala, si oppongono al moto e riducono il tempo e la distanza di volo.

Traiettoria del frammento.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia.

Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Tempo di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;
- dal tempo di volo.

6. MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da escludersi data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento.

Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello "Complex Rotational Motion", che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .

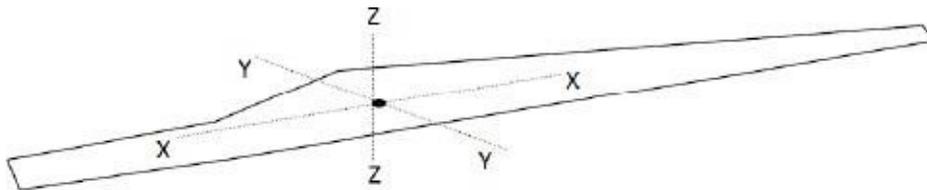


Figura 1 - Rappresentazione degli assi di rotazione

La rotazione della pala intorno all'asse zz è causato dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano.

La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala. In particolare si genera:

- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise.

Pertanto il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia in plane che out plane è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy.

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;
- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Di questi parametri si tiene sostanzialmente conto di studi specifici che prendono in considerazione vari casi e che permettono di concludere che:

- se si effettuassero calcoli che tengano in conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale si ottengono valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

Nel paragrafo vengono effettuati i calcoli della gittata per l'aerogeneratore in progetto, considerando solo parametri geometrici e cinematici e non l'effettivo moto rotazionale complesso, e pertanto otterremo valori della gittata sicuramente superiori rispetto a quelli reali.

7. CALCOLO DELLA GITTATA

Il calcolo della gittata è stato effettuato considerando soltanto i parametri cinematici e geometrici, in particolare considerando:

Modello tipo Vestas V172	
Altezza mozzo dal piano campagna (Hub)	114 [m]
Lunghezza lame	84,35 [m]
Diametro del rotore	172 [m]
Velocità di cut-off	25 [m/s]
Massima velocità di rotazione - n	12,1 [giri/min]
rg*	29,77 [m]

* valore ottenuto assumendo che, in relazione alle caratteristiche delle pale e la distribuzione dei pesi, il baricentro sia ad 1/3 rispetto alla lunghezza della pala.

Altre caratteristiche:

- θ è l'angolo, rispetto all'orizzontale a cui avviene il distacco
- $H_g = H + Y_g$, dove $Y_g = R_g \sin \theta$, indica la distanza (lungo l'asse y) del baricentro della pala rispetto al mozzo al momento del distacco
- $v_{x0} = v_g \cos \theta$, è la velocità lungo l'asse x
- $v_{y0} = v_g \sin \theta$, è la velocità lungo l'asse y

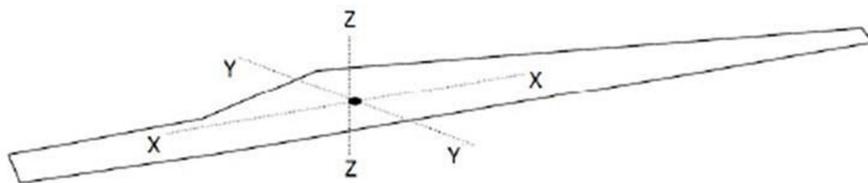


Figura 2 - Baricentro pala

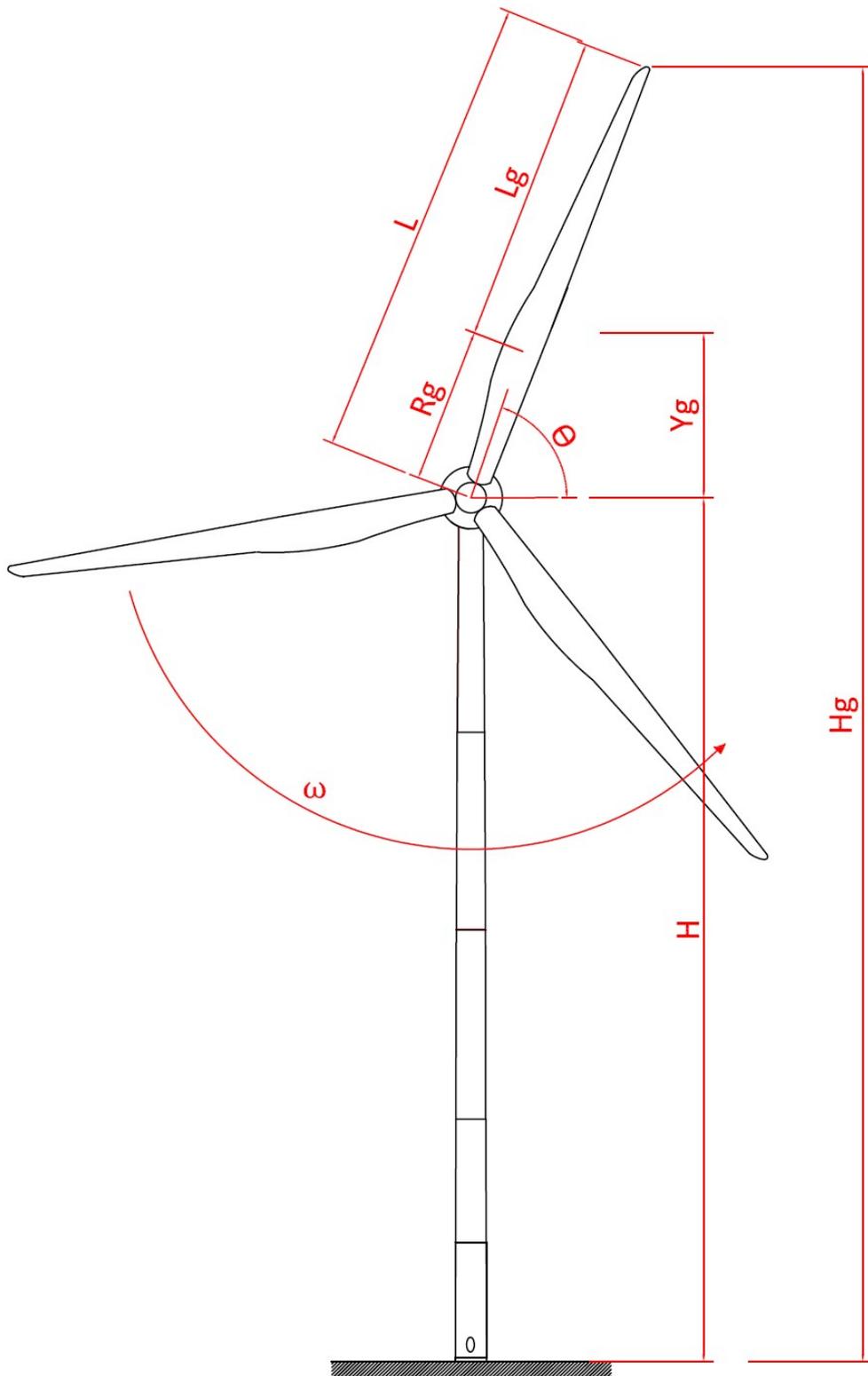


Figura 3 – Riferimenti geometrici di calcolo

Considerando la tipica traiettoria parabolica di un peso in caduta

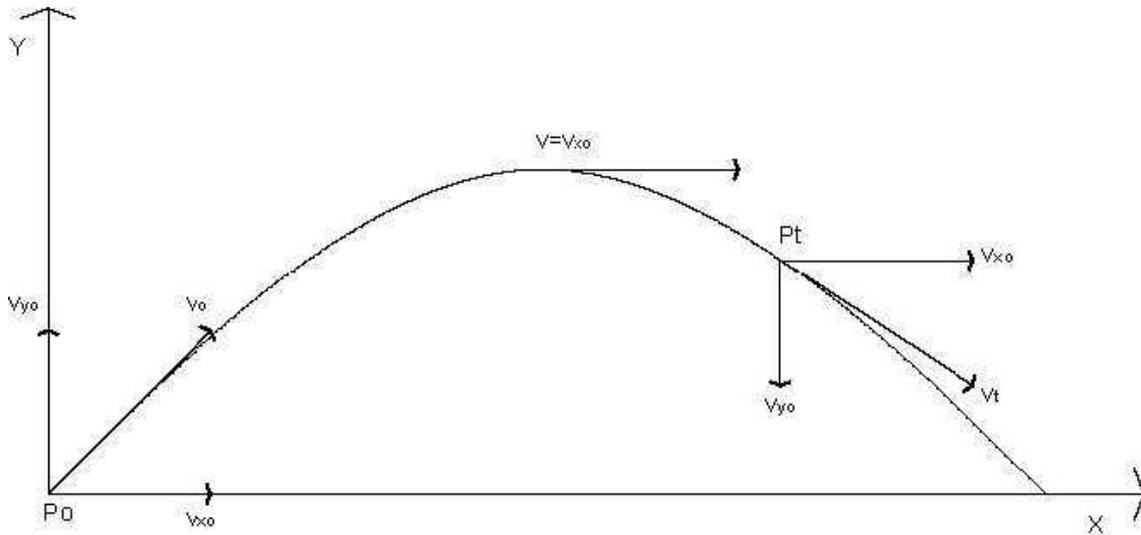


Figura 4 - Traiettoria di un grave in caduta

e le equazioni del moto corrispondente, considerando che il moto lungo l'asse x è rettilineo uniforme e lungo l'asse y è uniformemente accelerato, abbiamo:

$$V_x = V_{x0} \quad x = x_0 + V_{x0}t \quad V_y = gt + V_{y0} \quad y = \frac{1}{2}gt^2 + V_{y0}t + y_0$$

dove g è l'accelerazione di gravità e t il tempo del moto.

Applicando queste formule e risolvendo l'equazione del moto, con una serie di passaggi si perviene alla formula di calcolo della gittata massima.

$$Gittata_{max} = v_{x0} \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4 \left(\frac{1}{2}g \cdot H_G \right)}}{g}$$

E' evidente che V_{x0} , V_{y0} ed H_g dipendono dall'angolo θ , a cui avviene il distacco della pala e pertanto tale valore sarà calcolato per valori di θ che variano da 0° (pala in orizzontale) a 90° (pala in verticale, con massima estensione in altezza).

Al valore della gittata calcolato con questa formula andrà sommata la distanza X_g del baricentro della pala rispetto all'asse della torre al momento del distacco ($X_g = rg \cos \theta$) e la distanza del vertice della pala dal baricentro.

Al variare dell'angolo θ con il foglio di calcolo, si è determinata una distanza massima di gittata effettiva dell'organo rotante in distacco pari a 290,7 metri.

8. CONCLUSIONI

Nella presente relazione è stata esposta la descrizione tecnica complessiva del calcolo del rischio gittata in merito al progetto della centrale eolica sita nei comuni dei territori di: Cutro (KR) e Belcastro (CZ) PE “Cantorato”.

Dai calcoli si evince che il valore della gittata massimo ottenuto dal calcolo per il quale il punto estremo della pala potrà (teoricamente) raggiungere la distanza di circa 290,7 m dal centro della torre tubolare, entro tale distanza non sono presenti abitazioni o altri edifici e/o attività con presenza stabile e continuativa di persone, come si evince dagli elaborati grafici di progetto.

Catanzaro 31.07.2024

Il progettista
Ferraro architetto Francesco

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°

$$G = \frac{V_{x0}(V_{y0} + \sqrt{V_{y0}^2 + 2 \cdot g \cdot H_G})}{g} - X_g$$

dove:

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

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

$$Y_g = r_g \cdot \sin \alpha$$

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

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

$$X_g = r_g \cdot \cos \alpha \quad \text{posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre}$$

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

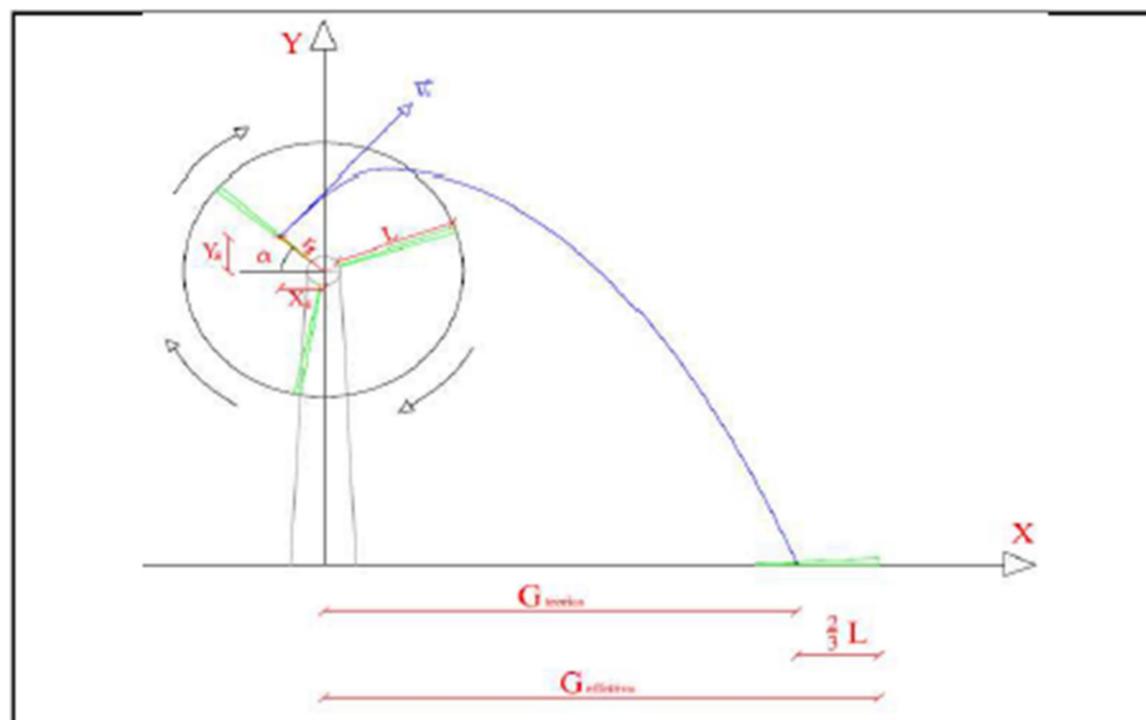
$$v_{y0} = v_0 \cdot \sin(90 - \alpha) = v_0 \cdot \cos \alpha$$

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

Gittata Effettiva

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

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



da inserire

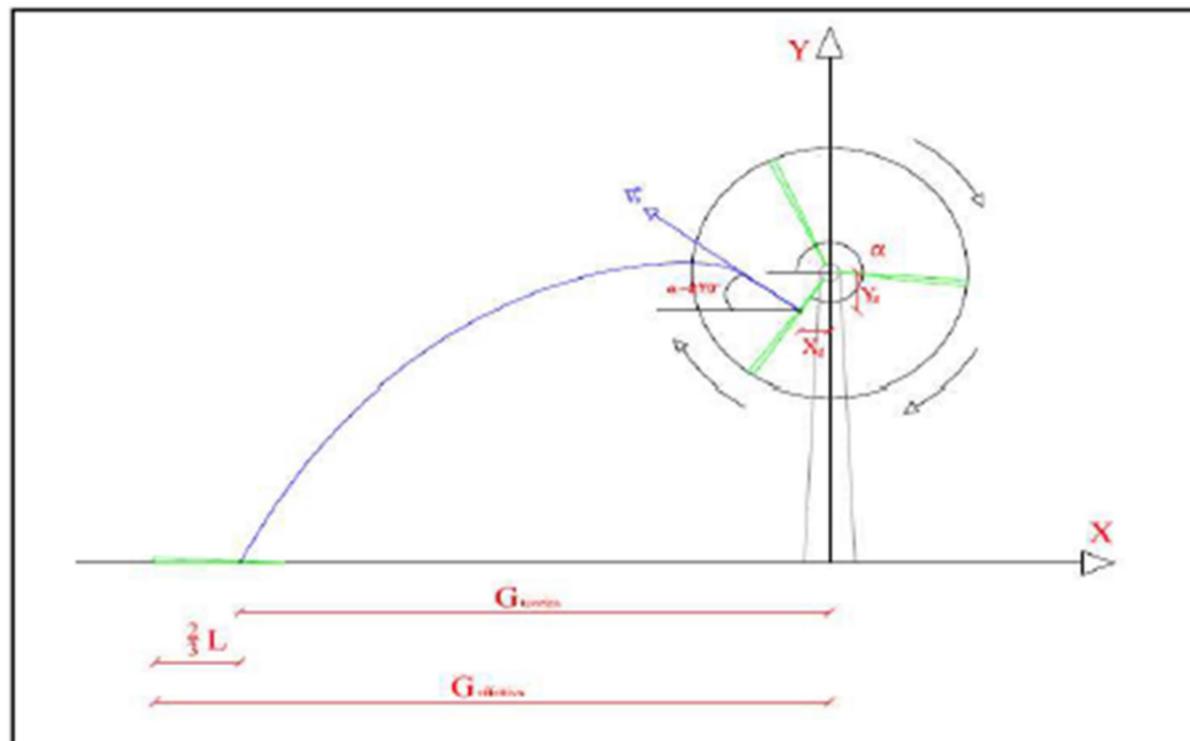
Numero di giri al minuto del rotore	n =	12,1
Lunghezza della pala in metri	L =	84,35
Altezza del mozzo in metri	H _{tomo} =	114

Se non è disponibile il valore di D, inserire almeno D=2L

Diametro del rotore D= 172

Angolo α	n	L	H _{tomo}	v ₀	v _{x0}	v _{y0}	H _G	D	r _g	g	Gittata teorica	X _g	L _g	Gittata Effettiva
0	12,10	84,35	114,00	37,72	0,00	37,72	114,00	172	29,77	9,81	-29,77	29,77	56,23	26,47
1	12,10	84,35	114,00	37,72	0,66	37,71	114,52	172	29,77	9,81	-23,17	29,76	56,23	33,07
2	12,10	84,35	114,00	37,72	1,32	37,69	115,04	172	29,77	9,81	-16,55	29,75	56,23	39,68
3	12,10	84,35	114,00	37,72	1,97	37,67	115,56	172	29,77	9,81	-9,93	29,73	56,23	46,30
4	12,10	84,35	114,00	37,72	2,63	37,63	116,08	172	29,77	9,81	-3,30	29,69	56,23	52,93
5	12,10	84,35	114,00	37,72	3,29	37,57	116,59	172	29,77	9,81	3,32	29,65	56,23	59,55
6	12,10	84,35	114,00	37,72	3,94	37,51	117,11	172	29,77	9,81	9,93	29,60	56,23	66,17
7	12,10	84,35	114,00	37,72	4,60	37,44	117,63	172	29,77	9,81	16,53	29,54	56,23	72,77
8	12,10	84,35	114,00	37,72	5,25	37,35	118,14	172	29,77	9,81	23,11	29,48	56,23	79,35
9	12,10	84,35	114,00	37,72	5,90	37,25	118,66	172	29,77	9,81	29,67	29,40	56,23	85,90
10	12,10	84,35	114,00	37,72	6,55	37,14	119,17	172	29,77	9,81	36,19	29,31	56,23	92,43
11	12,10	84,35	114,00	37,72	7,20	37,02	119,68	172	29,77	9,81	42,68	29,22	56,23	98,91
12	12,10	84,35	114,00	37,72	7,84	36,89	120,19	172	29,77	9,81	49,13	29,12	56,23	105,36
13	12,10	84,35	114,00	37,72	8,48	36,75	120,70	172	29,77	9,81	55,52	29,00	56,23	111,76
14	12,10	84,35	114,00	37,72	9,12	36,60	121,20	172	29,77	9,81	61,87	28,88	56,23	118,10
15	12,10	84,35	114,00	37,72	9,76	36,43	121,70	172	29,77	9,81	68,16	28,75	56,23	124,39
16	12,10	84,35	114,00	37,72	10,40	36,26	122,20	172	29,77	9,81	74,38	28,61	56,23	130,61
17	12,10	84,35	114,00	37,72	11,03	36,07	122,70	172	29,77	9,81	80,54	28,47	56,23	136,77
18	12,10	84,35	114,00	37,72	11,66	35,87	123,20	172	29,77	9,81	86,62	28,31	56,23	142,85
19	12,10	84,35	114,00	37,72	12,28	35,66	123,69	172	29,77	9,81	92,62	28,14	56,23	148,86
20	12,10	84,35	114,00	37,72	12,90	35,44	124,18	172	29,77	9,81	98,54	27,97	56,23	154,78
21	12,10	84,35	114,00	37,72	13,52	35,21	124,67	172	29,77	9,81	104,38	27,79	56,23	160,61
22	12,10	84,35	114,00	37,72	14,13	34,97	125,15	172	29,77	9,81	110,12	27,60	56,23	166,36
23	12,10	84,35	114,00	37,72	14,74	34,72	125,63	172	29,77	9,81	115,77	27,40	56,23	172,00
24	12,10	84,35	114,00	37,72	15,34	34,46	126,11	172	29,77	9,81	121,32	27,19	56,23	177,55
25	12,10	84,35	114,00	37,72	15,94	34,18	126,58	172	29,77	9,81	126,76	26,98	56,23	183,00
26	12,10	84,35	114,00	37,72	16,53	33,90	127,05	172	29,77	9,81	132,10	26,75	56,23	188,33
27	12,10	84,35	114,00	37,72	17,12	33,61	127,51	172	29,77	9,81	137,32	26,52	56,23	193,56
28	12,10	84,35	114,00	37,72	17,71	33,30	127,97	172	29,77	9,81	142,43	26,28	56,23	198,66
29	12,10	84,35	114,00	37,72	18,29	32,99	128,43	172	29,77	9,81	147,42	26,03	56,23	203,65
30	12,10	84,35	114,00	37,72	18,86	32,66	128,88	172	29,77	9,81	152,29	25,78	56,23	208,52
31	12,10	84,35	114,00	37,72	19,43	32,33	129,33	172	29,77	9,81	157,03	25,52	56,23	213,27
32	12,10	84,35	114,00	37,72	19,99	31,99	129,77	172	29,77	9,81	161,65	25,24	56,23	217,88
33	12,10	84,35	114,00	37,72	20,54	31,63	130,21	172	29,77	9,81	166,14	24,96	56,23	222,37
34	12,10	84,35	114,00	37,72	21,09	31,27	130,65	172	29,77	9,81	170,49	24,68	56,23	226,72
35	12,10	84,35	114,00	37,72	21,63	30,90	131,07	172	29,77	9,81	174,71	24,38	56,23	230,94
36	12,10	84,35	114,00	37,72	22,17	30,51	131,50	172	29,77	9,81	178,79	24,08	56,23	235,02
37	12,10	84,35	114,00	37,72	22,70	30,12	131,91	172	29,77	9,81	182,73	23,77	56,23	238,96
38	12,10	84,35	114,00	37,72	23,22	29,72	132,33	172	29,77	9,81	186,53	23,46	56,23	242,76
39	12,10	84,35	114,00	37,72	23,74	29,31	132,73	172	29,77	9,81	190,19	23,13	56,23	246,42
40	12,10	84,35	114,00	37,72	24,24	28,89	133,13	172	29,77	9,81	193,70	22,80	56,23	249,93
41	12,10	84,35	114,00	37,72	24,74	28,47	133,53	172	29,77	9,81	197,07	22,47	56,23	253,30
42	12,10	84,35	114,00	37,72	25,24	28,03	133,92	172	29,77	9,81	200,29	22,12	56,23	256,52
43	12,10	84,35	114,00	37,72	25,72	27,58	134,30	172	29,77	9,81	203,37	21,77	56,23	259,60
44	12,10	84,35	114,00	37,72	26,20	27,13	134,68	172	29,77	9,81	206,29	21,41	56,23	262,53
45	12,10	84,35	114,00	37,72	26,67	26,67	135,05	172	29,77	9,81	209,07	21,05	56,23	265,31
46	12,10	84,35	114,00	37,72	27,13	26,20	135,41	172	29,77	9,81	211,70	20,68	56,23	267,94
Angolo	n	L	H	v	v _x	v _y	H	D	r	g	Gittata	v	L	Gittata

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



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

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

Siccome abbiamo posto l'angolo 0° tra il 3° e 4° quadrante invertiamo il segno di v_{y0} e X_g

$$H_G = H_{max} - Y_g$$

$$Y_g = r_g \sin(360 - \alpha) = -r_g \sin \alpha$$

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

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

$$X_g = r_g \cos(360 - \alpha) = r_g \cos \alpha = -rg \cos \alpha$$

posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre

$$v_{y0} = v_0 \cos(\alpha - 270) = -v_0 \sin \alpha = v_0 \sin \alpha$$

$$v_{x0} = v_0 \sin(\alpha - 270) = v_0 \cos \alpha$$

$$v_0 = \omega r_g = (2\pi n r_g)/60$$

n = numero di giri al minuto del rotore

v_{y0} negativo perché verso sinistra

Gittata Effettiva

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

G negativo perché verso sinistra

α	n	L	H_{max}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
47	12.10	84.35	114.00	37.72	27.58	25.72	135.77	172	29.77	9.81	214.19	20.30	56.23	270.42
48	12.10	84.35	114.00	37.72	28.03	25.24	136.12	172	29.77	9.81	216.52	19.92	56.23	272.75
49	12.10	84.35	114.00	37.72	28.47	24.74	136.47	172	29.77	9.81	218.71	19.53	56.23	274.94
50	12.10	84.35	114.00	37.72	28.89	24.24	136.80	172	29.77	9.81	220.74	19.13	56.23	276.98
51	12.10	84.35	114.00	37.72	29.31	23.74	137.13	172	29.77	9.81	222.64	18.73	56.23	278.87
52	12.10	84.35	114.00	37.72	29.72	23.22	137.46	172	29.77	9.81	224.38	18.33	56.23	280.62
53	12.10	84.35	114.00	37.72	30.12	22.70	137.77	172	29.77	9.81	225.98	17.91	56.23	282.22
54	12.10	84.35	114.00	37.72	30.51	22.17	138.08	172	29.77	9.81	227.44	17.50	56.23	283.67
55	12.10	84.35	114.00	37.72	30.90	21.63	138.38	172	29.77	9.81	228.75	17.07	56.23	284.99
56	12.10	84.35	114.00	37.72	31.27	21.09	138.68	172	29.77	9.81	229.93	16.65	56.23	286.16
57	12.10	84.35	114.00	37.72	31.63	20.54	138.96	172	29.77	9.81	230.96	16.21	56.23	287.19
58	12.10	84.35	114.00	37.72	31.99	19.99	139.24	172	29.77	9.81	231.86	15.77	56.23	288.09
59	12.10	84.35	114.00	37.72	32.33	19.43	139.52	172	29.77	9.81	232.62	15.33	56.23	288.85
60	12.10	84.35	114.00	37.72	32.66	18.86	139.78	172	29.77	9.81	233.24	14.88	56.23	289.48
61	12.10	84.35	114.00	37.72	32.99	18.29	140.03	172	29.77	9.81	233.74	14.43	56.23	289.97
62	12.10	84.35	114.00	37.72	33.30	17.71	140.28	172	29.77	9.81	234.11	13.97	56.23	290.34
63	12.10	84.35	114.00	37.72	33.61	17.12	140.52	172	29.77	9.81	234.35	13.51	56.23	290.58
64	12.10	84.35	114.00	37.72	33.90	16.53	140.75	172	29.77	9.81	234.47	13.05	56.23	290.70
65	12.10	84.35	114.00	37.72	34.18	15.94	140.98	172	29.77	9.81	234.46	12.58	56.23	290.69
66	12.10	84.35	114.00	37.72	34.46	15.34	141.19	172	29.77	9.81	234.34	12.11	56.23	290.57
67	12.10	84.35	114.00	37.72	34.72	14.74	141.40	172	29.77	9.81	234.10	11.63	56.23	290.33
68	12.10	84.35	114.00	37.72	34.97	14.13	141.60	172	29.77	9.81	233.75	11.15	56.23	289.98
69	12.10	84.35	114.00	37.72	35.21	13.52	141.79	172	29.77	9.81	233.29	10.67	56.23	289.52
70	12.10	84.35	114.00	37.72	35.44	12.90	141.97	172	29.77	9.81	232.72	10.18	56.23	288.96
71	12.10	84.35	114.00	37.72	35.66	12.28	142.14	172	29.77	9.81	232.05	9.69	56.23	288.29
72	12.10	84.35	114.00	37.72	35.87	11.66	142.31	172	29.77	9.81	231.28	9.20	56.23	287.52
73	12.10	84.35	114.00	37.72	36.07	11.03	142.47	172	29.77	9.81	230.42	8.70	56.23	286.65
74	12.10	84.35	114.00	37.72	36.26	10.40	142.61	172	29.77	9.81	229.46	8.20	56.23	285.69
75	12.10	84.35	114.00	37.72	36.43	9.76	142.75	172	29.77	9.81	228.41	7.70	56.23	284.64
76	12.10	84.35	114.00	37.72	36.60	9.12	142.88	172	29.77	9.81	227.27	7.20	56.23	283.51
77	12.10	84.35	114.00	37.72	36.75	8.48	143.00	172	29.77	9.81	226.06	6.70	56.23	282.29
78	12.10	84.35	114.00	37.72	36.89	7.84	143.12	172	29.77	9.81	224.76	6.19	56.23	280.99
79	12.10	84.35	114.00	37.72	37.02	7.20	143.22	172	29.77	9.81	223.38	5.68	56.23	279.62
80	12.10	84.35	114.00	37.72	37.14	6.55	143.31	172	29.77	9.81	221.94	5.17	56.23	278.17
81	12.10	84.35	114.00	37.72	37.25	5.90	143.40	172	29.77	9.81	220.42	4.66	56.23	276.65
82	12.10	84.35	114.00	37.72	37.35	5.25	143.48	172	29.77	9.81	218.84	4.14	56.23	275.07
83	12.10	84.35	114.00	37.72	37.44	4.60	143.54	172	29.77	9.81	217.19	3.63	56.23	273.43
84	12.10	84.35	114.00	37.72	37.51	3.94	143.60	172	29.77	9.81	215.49	3.11	56.23	271.72
85	12.10	84.35	114.00	37.72	37.57	3.29	143.65	172	29.77	9.81	213.73	2.59	56.23	269.96
86	12.10	84.35	114.00	37.72	37.63	2.63	143.69	172	29.77	9.81	211.91	2.08	56.23	268.15
87	12.10	84.35	114.00	37.72	37.67	1.97	143.73	172	29.77	9.81	210.05	1.56	56.23	266.29
88	12.10	84.35	114.00	37.72	37.69	1.32	143.75	172	29.77	9.81	208.14	1.04	56.23	264.38
89	12.10	84.35	114.00	37.72	37.71	0.66	143.76	172	29.77	9.81	206.19	0.52	56.23	262.42
90	12.10	84.35	114.00	37.72	37.72	0.00	143.77	172	29.77	9.81	204.20	0.00	56.23	260.43

Per un angolo compreso tra 270° e 360° il valore della Gittata sarà negativo perché verso sinistra

Angolo α	n	L	H_{max}	v_0	v_{x0}	v_{y0}	H_g	D	r_g	g	Gittata teorica	X_g	L_g	Gittata Effettiva
270	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.72	0.00	84.23	172	29.77	9.81	-156.30	0.00	56.23	-212.54
271	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.71	0.66	84.24	172	29.77	9.81	-159.35	0.52	56.23	-215.59
272	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.69	1.32	84.25	172	29.77	9.81	-162.40	1.04	56.23	-218.64
273	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.67	1.97	84.27	172	29.77	9.81	-165.45	1.56	56.23	-221.68
274	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.63	2.63	84.31	172	29.77	9.81	-168.48	2.08	56.23	-224.72
275	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.57	3.29	84.35	172	29.77	9.81	-171.51	2.59	56.23	-227.74
276	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.51	3.94	84.40	172	29.77	9.81	-174.51	3.11	56.23	-230.75
277	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.44	4.60	84.46	172	29.77	9.81	-177.50	3.63	56.23	-233.73
278	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.35	5.25	84.52	172	29.77	9.81	-180.46	4.14	56.23	-236.69
279	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.25	5.90	84.57	172	29.77	9.81	-183.39	4.66	56.23	-239.62
280	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.14	6.55	84.62	172	29.77	9.81	-186.29	5.17	56.23	-242.52
281	12.10	84.35	114.00	37.72	-37.02	7.20	84.67	172	29.77	9.81	-189.16	5.68	56.23	-245.39
282	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.89	7.84	84.72	172	29.77	9.81	-192.00	6.19	56.23	-248.23
283	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.75	8.48	84.77	172	29.77	9.81	-194.81	6.70	56.23	-251.04
284	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.60	9.12	84.82	172	29.77	9.81	-197.59	7.20	56.23	-253.81
285	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.43	9.76	84.87	172	29.77	9.81	-200.34	7.70	56.23	-256.54
286	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.26	10.40	84.92	172	29.77	9.81	-203.06	8.20	56.23	-259.23
287	12.10	84.35	114.00	37.72	-36.07	11.03	84.97	172	29.77	9.81	-205.75	8.70	56.23	-261.88
288	12.10	84.35	114.00	37.72	-35.87	11.66	85.02	172	29.77	9.81	-208.41	9.20	56.23	-264.49
289	12.10	84.35	114.00	37.72	-35.66	12.28	85.07	172	29.77	9.81	-211.04	9.69	56.23	-267.06
290	12.10	84.35	114.00	37.72	-35.44	12.90	85.12	172	29.77	9.81	-213.64	10.18	56.23	-269.59
291	12.10	84.35	114.00	37.72	-35.21	13.52	85.17	172	29.77	9.81	-216.21	10.67	56.23	-272.08
292	12.10	84.35	114.00	37.72	-34.97	14.13	85.22	172	29.77	9.81	-218.75	11.15	56.23	-274.53
293	12.10	84.35	114.00	37.72	-34.72	14.74	85.27	172	29.77	9.81	-221.26	11.63	56.23	-276.94
294	12.10	84.35	114.00	37.72	-34.46	15.34	85.32	172	29.77	9.81	-223.74	12.11	56.23	-279.31
295	12.10	84.35	114.00	37.72	-34.18	15.94	85.37	172	29.77	9.81	-226.19	12.58	56	

339	12.10	84.35	114.00	37.72	-13.52	35.21	103.33	172	29.77	9.81	-155.07	27.79	56.23	-211.30
340	12.10	84.35	114.00	37.72	-12.90	35.44	103.82	172	29.77	9.81	-150.04	27.97	56.23	-206.28
341	12.10	84.35	114.00	37.72	-12.28	35.66	104.31	172	29.77	9.81	-144.89	28.14	56.23	-201.13
342	12.10	84.35	114.00	37.72	-11.66	35.87	104.80	172	29.77	9.81	-139.62	28.31	56.23	-195.86
343	12.10	84.35	114.00	37.72	-11.03	36.07	105.30	172	29.77	9.81	-134.24	28.47	56.23	-190.47
344	12.10	84.35	114.00	37.72	-10.40	36.26	105.80	172	29.77	9.81	-128.74	28.61	56.23	-184.98
345	12.10	84.35	114.00	37.72	-9.76	36.43	106.30	172	29.77	9.81	-123.14	28.75	56.23	-179.37
346	12.10	84.35	114.00	37.72	-9.12	36.60	106.80	172	29.77	9.81	-117.44	28.88	56.23	-173.67
347	12.10	84.35	114.00	37.72	-8.48	36.75	107.30	172	29.77	9.81	-111.63	29.00	56.23	-167.87
348	12.10	84.35	114.00	37.72	-7.84	36.89	107.81	172	29.77	9.81	-105.74	29.12	56.23	-161.97
349	12.10	84.35	114.00	37.72	-7.20	37.02	108.32	172	29.77	9.81	-99.76	29.22	56.23	-155.99
350	12.10	84.35	114.00	37.72	-6.55	37.14	108.83	172	29.77	9.81	-93.70	29.31	56.23	-149.93
351	12.10	84.35	114.00	37.72	-5.90	37.25	109.34	172	29.77	9.81	-87.56	29.40	56.23	-143.79
352	12.10	84.35	114.00	37.72	-5.25	37.35	109.86	172	29.77	9.81	-81.35	29.48	56.23	-137.58
353	12.10	84.35	114.00	37.72	-4.60	37.44	110.37	172	29.77	9.81	-75.07	29.54	56.23	-131.30
354	12.10	84.35	114.00	37.72	-3.94	37.51	110.89	172	29.77	9.81	-68.73	29.60	56.23	-124.97
355	12.10	84.35	114.00	37.72	-3.29	37.57	111.41	172	29.77	9.81	-62.34	29.65	56.23	-118.58
356	12.10	84.35	114.00	37.72	-2.63	37.63	111.92	172	29.77	9.81	-55.90	29.69	56.23	-112.14
357	12.10	84.35	114.00	37.72	-1.97	37.67	112.44	172	29.77	9.81	-49.42	29.73	56.23	-105.65
358	12.10	84.35	114.00	37.72	-1.32	37.69	112.96	172	29.77	9.81	-42.90	29.75	56.23	-99.13
359	12.10	84.35	114.00	37.72	-0.66	37.71	113.48	172	29.77	9.81	-36.35	29.76	56.23	-92.58
360	12.10	84.35	114.00	37.72	0.00	37.72	114.00	172	29.77	9.81	-29.77	29.77	56.23	-86.00