

10_04_EO_ENL_PD_09_RE_4_00	02_04_2010	CARATTERISTICHE AEROGENERATORI	ING. ALESSANDRA SGURA	ARCH. PAOLA PASTORE	
N. ELABORATO	DATA EMISSIONE	DESCRIZIONE	ESEGUITO	CONTROLLATO	APPROVATO

PROGETTO:
PARCO EOLICO "MARUGGIO - SAVA - TORRICELLA"

COMMITTENTE:



Enel Green Power
via Regina Margherita, 125
00198 Roma

TITOLO:
- CARATTERISTICHE AEROGENERATORI

PROJETTO engineering s.r.l.
società d'ingegneria
amm.re unico
Ph.D. Ing. LEONARDO FILOTICO

Via dei Mille, 5
74024 Manduria
web site: www.progetto.eu

Tel/fax: 099.9735188
studio@progetto.eu
P.IVA: 02658050733

TIMBRO:

SOSTITUISCE:

SOSTITUITO DA:

CARTA: A4

NOME FILE:
10_04_EO_ENL_PD_09_RE_4_00

SCALA:

ELAB:
RP.09

INDICE

1. INTRODUZIONE.....	2
2. DATI DI PROGETTO E SICUREZZA PER "REPOWER MM 92" DA 2050 KW (R. R. 16/2006, ART. 10 C.1 LETTERA G);.....	5
2.1 Calcolo della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale;.....	5
2.2 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica;.....	6
2.3 Calcolo della velocità periferica;.....	10
2.4 Calcolo della gittata massima.....	10

1. INTRODUZIONE

Come descrizione, a titolo esemplificativo, si considerano le macchine del tipo "REpower MM 92" da 2050 kW come le schede tecniche allegate:

MM92

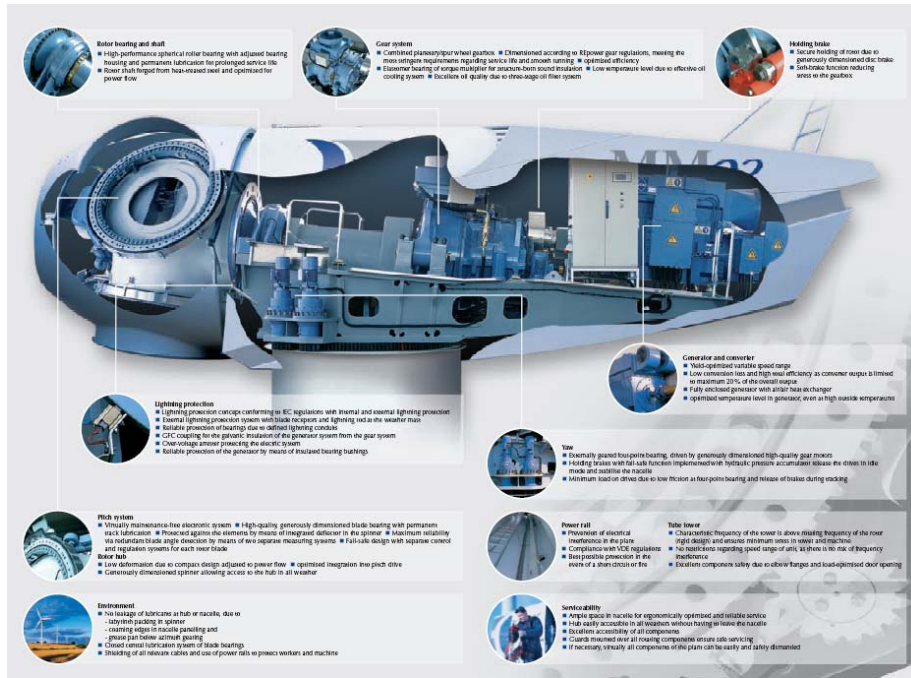
The MM92 has a swept rotor area of 6,720 square metres and is available with hub heights between 68.5 and 100 metres. It has been specifically optimised for use in regions of low to medium wind speeds.



The wind power plants of the MM series are based on the well-established technology driven concept of the

1.5-megawatt MD series with variable speed generator and converter system and electrical single-blade adjustment. The second generation of these high-performance power plants offer the same high reliability and maximum power output as previous models. Due to the leading technology and innovative solutions developed by REpower, the company's wind turbines can be fully integrated into the existing power grid.

Due to the excellent design in every detail, the MM series offers you excellent returns over the entire service life of the equipment.



MM92

Technical data

Power	
Rated power	2,050 kW
Cut-in speed	3.0 m/s
Rated wind speed	12.5 m/s
Cut-out speed	24.0 m/s
Wind zone	up to IEC 3
Type class	up to IEC IIIa
Tower	
Diameter	92.5 m
Rotor area	6,720 m ²
Rotor speed	7.8 - 15.0 rpm (+12.5%)
Rotor blades	
Length	45.2 m
Type	GRP sandwich construction; manufactured in infusion-process
Yaw system	
Type	Double-row externally geared four-point bearing
Drive system	Casir motors
Stabilisation	Disc brake
Gear system	
Type	combined planetary/gear wheel gearbox
Transmission ratio	i = approx. 120.0
Generator system	
Generator type	Double-fed asynchronous generator, 4-pole (50 Hz)
Rated power	6-pole (60 Hz)
Rated voltage	2,050 kW
	690 V (50 Hz)
	575 V (60 Hz)
Rated speed	900 - 1,600 rpm (50 Hz)
	720 - 1,440 rpm (60 Hz)
Generator protection class	IP 54
Converter type	Pulse width-modulated IGBTs
Power control	
Principle	Electrical blade angle adjustment - pitch and speed control
Shaft	
Type	Steel tube
Hub height	68.5 / 78.5 / 80 / 100 m
Foundation	
Reinforced concrete foundation with foundation insert, adjusted to site conditions	
Safety system	
Individually adjustable blades (electrically controlled) - fail-safe system	
Extensive redundant temperature and speed sensing system	
Fully integrated lightning protection	
Shielded cables and power rails protecting people and machinery	
Rotor holding brake with soft-brake function	

General data

- Surface : 6648 m²
- Power density : 3.3 m²/kW
- Wings number : 3
- Power control : Pitch
- Available since : 2005

Weight

- Hub : 66 tons
- Rotor : 40,7 tons

Rotor

- Min rotation speed : 7.8 rounds/minute
- Max rotation speed : 15 rounds/minute
- Min wind speed : 3 m/s
- Nominal wind speed : 12.5 m/s
- Max wind speed : 24.9 m/s
- Manufacturer : LM

Gear box

- Speed number : 3
- Ratio : 1:120

Tower

- Min hub height : 79 m
- Max hub height : 100 m

2. DATI DI PROGETTO E SICUREZZA PER "REPOWER MM 92" DA 2050 KW (R. R. 16/2006, ART. 10 C.1 LETTERA G);

Nella presente relazione viene calcolata la gittata massima degli elementi rotanti, in caso di rottura accidentale, della macchina "REpower MM92" da 2000 kW.

2.1 Calcolo della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale;

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. Per tale regione si è considerato il caso di rottura per distacco di un aerogeneratore dalle seguenti caratteristiche:

Specifiche tecniche dell'aerogeneratore

principale dati tecnici dell'aerogeneratore sono di seguito evidenziati.

Diametro (MM92) [m]	92
Numero di pale	3
Altezza del mozzo massima [m]	100,0
Potenza nominale [MW]	2
Velocità di rotazione [rpm]	7 -15
Velocità di Cut-in [m/s]	3,0
Velocità di Cut-out [m/s]	24,9
Velocità nominale [m/s]	12,5
Controllo della Potenza	Angolo di Pitch

Con lo studio del moto di un proiettile si intende fornire un modello generale per studiare i fenomeni dei corpi che vengono lanciati (o urtano ad esempio) con un angolo di alzo obliquo, con una velocità costante e che compiono un moto parabolico. Chiaramente la resistenza dell'aria non è assolutamente trascurabile.

Infatti, più il corpo è grande, più la resistenza dell'aria (o di un altro fluido) influisce sulle variabili del moto (gittata, altezza massima, tempo di caduta). Una caratteristica importante della resistenza aerodinamica dei fluidi è che essa dipende dalla velocità: più veloci sono gli oggetti più

grande è la resistenza dei fluidi nei quali si muovono: tale premessa è utile per ritenere trascurabili le forze ed il momento di resistenza dovute al mezzo in cui si svolge il moto (aria).

Nel caso notevole di un proiettile non puntiforme, le equazioni che governano il moto sono rispettivamente la prima e la seconda equazione della dinamica:

$$M \cdot g = Ma_G$$

$$I \frac{d\omega}{dt} = 0$$

Supponendo di concentrare tutto nel centro di massa, il momento della forza peso è nullo (avendo scelto G come polo dei momenti). Pertanto la seconda equazione ci dice che il corpo durante la traiettoria che percorre, gira indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione del problema viene dalla risoluzione della prima equazione; ed evidenzia che la pala si muoverà con il moto di un proiettile puntiforme e, di conseguenza, ne compirà il caratteristico andamento parabolico.

Il moto di un proiettile si può pensare come la composizione di due moti: uno rettilineo uniforme in direzione orizzontale, e uno uniformemente accelerato (con accelerazione modulo g) in direzione verticale. Ne segue che la traiettoria seguita da un corpo, se è denso e poco esteso, o altrimenti dal suo centro di massa, ha un andamento parabolico. La gittata è la distanza tra il punto in cui viene lanciato un proiettile (con velocità iniziale inclinata verso l'alto rispetto all'orizzontale) e il punto in cui esso ritorna al suolo. È interessante osservare che all'aumentare dell'angolo a formato con il terreno, la gittata del proiettile aumenta, presentando valore massimo per un angolo a pari a $\pi/4$; ad ulteriori incrementi dell'angolo a il valore della gittata torna a diminuire presentando un valore nullo allorché il proiettile è lanciato verso l'alto con angolo pari a π .

Per studiare la gittata di un proiettile che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) utilizzeremo un sistema di riferimento cartesiano xy in cui l'origine O degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il proiettile è stato lanciato.

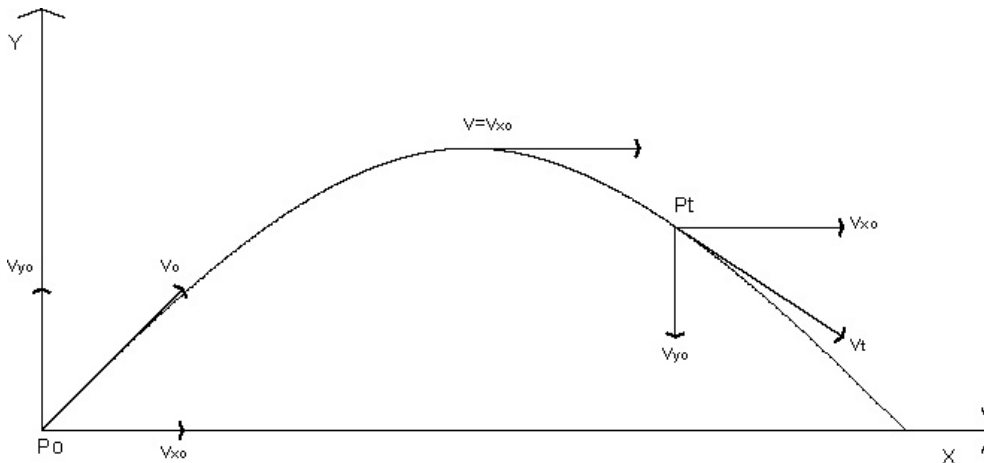
2.2 Studio del moto del proiettile mediante le equazioni della cinematica;

Considereremo il moto bidimensionale di un proiettile, come il moto di un punto materiale, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Sceghieremo un sistema di riferimento con l'origine degli assi O centrata nel punto di partenza del corpo (x_0, y_0) , con l'asse delle Y positivo verso l'alto, e l'asse positivo delle X nello stesso verso del moto orizzontale del proiettile; le componenti dell'accelerazione saranno

$$a_x = 0 \quad a_y = -g.$$

Rappresenteremo la legge di caduta di un grave, ovvero di un punto materiale, lanciato nello spazio con velocità iniziale v_0 e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di θ come in figura:



Ricordando che:

$$a_x = 0 \quad a_y = g \quad (\text{dove } g = -9,81 \text{ m/sec}^2)$$

e considerando che:

Direzione x: il MOTO è RETTILINEO UNIFORME

Direzione y: il MOTO è UNIFORMEMENTE ACCELERATO

La velocità v_0 ha componenti nelle due direzioni:

$$v_x = v_0 \cos \theta$$

$$v_y = v_0 \sin \theta$$

Da cui:

$$\begin{aligned} v_x &= v_{x0} & x &= x_0 + v_{x0}t \\ v_y &= gt + v_{y0} & y &= \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 \end{aligned} \quad \text{e}$$

GITTATA MASSIMA

La gittata è la distanza percorsa dal proiettile in direzione x prima di toccare terra.

Questo valore si trova imponendo che nella equazione

$$y = \frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0$$

sia nullo y determinando così l'istante t in cui avviene il transito (e in questo caso l'impatto) alla quota $y = 0$ sarà:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t + y_0 = 0$$

Nell'ipotesi semplificativa che $y_0 = 0$ si ottiene:

$$\frac{1}{2}gt^2 + v_{y0}t = 0$$

da cui le due soluzioni:

$$t_0 = 0 \qquad t_1 = -\frac{2v_{y0}}{g} = -\frac{2v_0 \sin \theta}{g}$$

t_0 corrisponde all'istante di lancio del proiettile (abbiamo infatti ipotizzato per semplicità che $y_0 = 0$); t_1 all'istante in cui il proiettile, avvenuto il lancio, tocca nuovamente terra. Sostituendo quest'ultimo valore nell'equazione $x = x_0 + v_{x0}t$, descrittiva del moto lungo x , si ricaverà il valore della gittata:

$$x = x_0 - 2 \frac{v_0^2}{g} \sin \theta \cos \theta$$

Ipotizzando per semplicità che

$$x_0 = 0$$

ed essendo

$$2\sin\theta\cos\theta = \sin 2\theta$$

si può riscrivere la equazione per il calcolo della gittata come:

$$x = -\frac{v_0^2}{g} \sin 2\theta$$

La gittata massima è così funzione del modulo della velocità iniziale, della ascissa e della quota iniziale di lancio (che in questo caso semplificato sono state considerate nulle), e di θ angolo di inclinazione della gittata: in particolare essa sarà massima quando $\sin 2\theta = 1$ cioè $2\theta = \pi/2$ ossia $\theta = \pi/4$.

Nel caso in questione y_0 non sarà uguale a zero, ma corrispondente alla quota del baricentro G del sistema ipotizzato rispetto alla quota del piano di campagna.

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ossia $r_g = 15,3 \text{ m}$. essendo il raggio di ciascuna pala uguale a 46 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

$$y_0 = H_{\text{torre}} + Y_g$$

dove

$$Y_g = \frac{1}{3} r_g \cdot \sin \theta$$

Ciò implica che la soluzione di t sarà:

$$t = \frac{-v_{y0} \pm \sqrt{v_{y0}^2 - 4\left(\frac{1}{2}gy_0\right)}}{g}$$

tale valore andrà sostituito nell'equazione descrittiva del moto lungo x, per trovare la gittata massima.

2.3 Calcolo della velocità periferica;

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω al minuto del corpo in movimento.

Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio r percorre la circonferenza $2\pi r$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2\pi nr$ metri/minuto. E questo sarà lo spazio percorso da tutti i punti situati sulla periferia del corpo in movimento circolare.

Dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante (considerando la velocità massima del rotore di 15 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 24,021 \text{ m/sec}$$

2.4 Calcolo della gittata massima

Quindi, nell'ipotesi di distacco di una pala nel punto di serraggio del mozzo, punto di maggiore sollecitazione a causa del collegamento, vengono considerate le seguenti ipotesi:

- il moto del sistema è considerato di tipo rigido non vincolato;
- si ritengono trascurabili le forze di resistenza dell'aria;
- le componenti dell'accelerazione saranno $a_x = 0$, $a_y = -g$.
- la velocità periferica v_g è uguale a 24,021 m/sec.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma $(0, H_G = H_{torre} + Y_g)$ ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

La risoluzione dell'equazione descrittiva del moto, nelle suddette condizioni, sarà quindi:

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

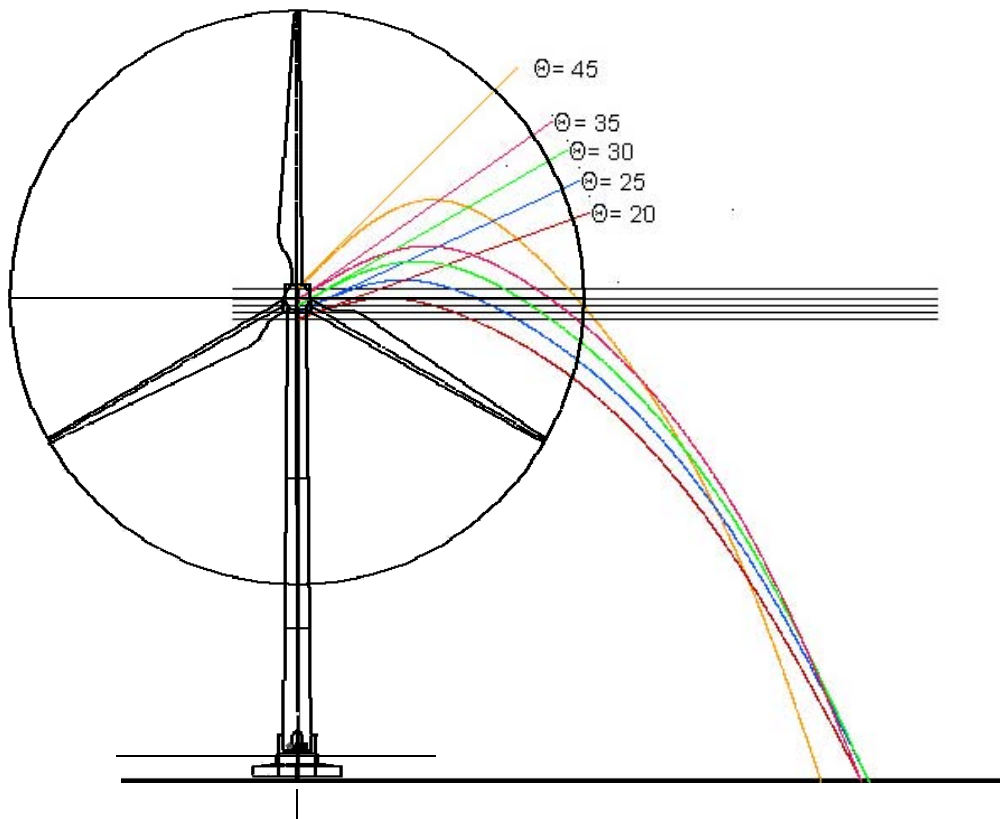
Al valore di gittata massima andrà aggiunta la distanza X_g del baricentro rispetto all'asse della torre ($X_g = r_g \cdot \cos\theta$) e la distanza del vertice della pala considerato nelle condizioni più gravose, ovvero disposto nella parte più lontana dal baricentro, ossia a $L_g = 46,00m$.

Nella tabella che segue si sono indicati i valori più rappresentativi della gittata massima e della distanza totale dalla torre nel punto di caduta rispetto a valori di θ .

θ	V_x	V_y	H_G	Gittata _{max}	X_g	L_g	Distanza Totale
[°]	[m/s]	[m/s]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]
0	24,02	0,00	120,00	118,81	15,30	46	180,11
1	24,02	0,42	120,27	119,96	15,30	46	181,25
2	24,01	0,84	120,53	121,07	15,29	46	182,36
3	23,99	1,26	120,80	122,16	15,28	46	183,44
4	23,96	1,68	121,07	123,21	15,26	46	184,48
5	23,93	2,09	121,33	124,23	15,24	46	185,47
6	23,89	2,51	121,60	125,22	15,22	46	186,43
7	23,84	2,93	121,86	126,17	15,19	46	187,35
8	23,79	3,34	122,13	127,08	15,15	46	188,23
9	23,73	3,76	122,39	127,95	15,11	46	189,06
10	23,66	4,17	122,66	128,78	15,07	46	189,85
11	23,58	4,58	122,92	129,57	15,02	46	190,59
12	23,50	4,99	123,18	130,31	14,97	46	191,28
13	23,41	5,40	123,44	131,01	14,91	46	191,92
14	23,31	5,81	123,70	131,67	14,85	46	192,51
15	23,20	6,22	123,96	132,27	14,78	46	193,05
16	23,09	6,62	124,22	132,82	14,71	46	193,53
17	22,97	7,02	124,47	133,33	14,63	46	193,96
18	22,85	7,42	124,73	133,78	14,55	46	194,33
19	22,71	7,82	124,98	134,17	14,47	46	194,64
20	22,57	8,22	125,23	134,52	14,38	46	194,89
21	22,43	8,61	125,48	134,80	14,28	46	195,08
22	22,27	9,00	125,73	135,03	14,19	46	195,21
23	22,11	9,39	125,98	135,19	14,08	46	195,28
24	21,94	9,77	126,22	135,30	13,98	46	195,28
25	21,77	10,15	126,47	135,34	13,87	46	195,21
26	21,59	10,53	126,71	135,33	13,75	46	195,08

27	21,40	10,91	126,95	135,25	13,63	46	194,88
28	21,21	11,28	127,18	135,10	13,51	46	194,61
29	21,01	11,65	127,42	134,89	13,38	46	194,27
30	20,80	12,01	127,65	134,61	13,25	46	193,86
31	20,59	12,37	127,88	134,26	13,11	46	193,37
32	20,37	12,73	128,11	133,84	12,98	46	192,82
33	20,15	13,08	128,33	133,36	12,83	46	192,19
34	19,91	13,43	128,56	132,80	12,68	46	191,49
35	19,68	13,78	128,78	132,18	12,53	46	190,71
36	19,43	14,12	128,99	131,48	12,38	46	189,86
37	19,18	14,46	129,21	130,71	12,22	46	188,93
38	18,93	14,79	129,42	129,87	12,06	46	187,92
39	18,67	15,12	129,63	128,95	11,89	46	186,84
40	18,40	15,44	129,83	127,97	11,72	46	185,69
41	18,13	15,76	130,04	126,90	11,55	46	184,45
42	17,85	16,07	130,24	125,77	11,37	46	183,14
43	17,57	16,38	130,43	124,56	11,19	46	181,75
44	17,28	16,69	130,63	123,28	11,01	46	180,29
45	16,99	16,99	130,82	121,93	10,82	46	178,75
46	16,69	17,28	131,01	120,50	10,63	46	177,13
47	16,38	17,57	131,19	119,00	10,43	46	175,43
48	16,07	17,85	131,37	117,42	10,24	46	173,66
49	15,76	18,13	131,55	115,78	10,04	46	171,81
50	15,44	18,40	131,72	114,06	9,83	46	169,89
51	15,12	18,67	131,89	112,27	9,63	46	167,89
52	14,79	18,93	132,06	110,40	9,42	46	165,82
53	14,46	19,18	132,22	108,47	9,21	46	163,68
54	14,12	19,43	132,38	106,47	8,99	46	161,46
55	13,78	19,68	132,53	104,40	8,78	46	159,18
56	13,43	19,91	132,68	102,26	8,56	46	156,82
57	13,08	20,15	132,83	100,06	8,33	46	154,39
58	12,73	20,37	132,98	97,79	8,11	46	151,89
59	12,37	20,59	133,11	95,45	7,88	46	149,33
60	12,01	20,80	133,25	93,05	7,65	46	146,70
61	11,65	21,01	133,38	90,59	7,42	46	144,01
62	11,28	21,21	133,51	88,07	7,18	46	141,25
63	10,91	21,40	133,63	85,49	6,95	46	138,43
64	10,53	21,59	133,75	82,85	6,71	46	135,55
65	10,15	21,77	133,87	80,15	6,47	46	132,62
66	9,77	21,94	133,98	77,40	6,22	46	129,62
67	9,39	22,11	134,08	74,59	5,98	46	126,57

68	9,00	22,27	134,19	71,74	5,73	46	123,47
69	8,61	22,43	134,28	68,83	5,48	46	120,31
70	8,22	22,57	134,38	65,88	5,23	46	117,11
71	7,82	22,71	134,47	62,88	4,98	46	113,86
72	7,42	22,85	134,55	59,83	4,73	46	110,56
73	7,02	22,97	134,63	56,75	4,47	46	107,22
74	6,62	23,09	134,71	53,62	4,22	46	103,84
75	6,22	23,20	134,78	50,46	3,96	46	100,42
76	5,81	23,31	134,85	47,26	3,70	46	96,96
77	5,40	23,41	134,91	44,03	3,44	46	93,47
78	4,99	23,50	134,97	40,76	3,18	46	89,94
79	4,58	23,58	135,02	37,47	2,92	46	86,39
80	4,17	23,66	135,07	34,15	2,66	46	82,80
81	3,76	23,73	135,11	30,80	2,39	46	79,20
82	3,34	23,79	135,15	27,44	2,13	46	75,57
83	2,93	23,84	135,19	24,05	1,86	46	71,91
84	2,51	23,89	135,22	20,65	1,60	46	68,25
85	2,09	23,93	135,24	17,23	1,33	46	64,56
86	1,68	23,96	135,26	13,80	1,07	46	60,86
87	1,26	23,99	135,28	10,36	0,80	46	57,16
88	0,84	24,01	135,29	6,91	0,53	46	53,44
89	0,42	24,02	135,30	3,46	0,27	46	49,72
90	0,00	24,02	135,30	0,00	0,00	46	46,00



In conclusione scegliendo il valore che rappresenta le condizioni più gravose ossia quello con un angolo di lancio $\theta = 25$ e sommando la sua distanza orizzontale dal baricentro ($13,87 m$) e la distanza del vertice della pala ($41,00 m$) si ha la **distanza massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale è di circa $195,21 m$.**