



REGIONE CAMPANIA

Comune principale impianto



COMUNE DI VALVA
PROVINCIA DI SALERNO

Opere connesse



COMUNE DI CALABRITTO
PROVINCIA DI AVELLINO



PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA PRODUZIONE DI ENERGIA ELETTRICA DA FONTE EOLICA, AI SENSI DEL D.LGS N. 387 DEL 2003, COMPOSTO DA N° 7 AEROGENERATORI, PER UNA POTENZA COMPLESSIVA DI 30,1 MW, SITO NEL COMUNE DI VALVA (SA) E OPERE CONNESSE NEL COMUNE DI CALABRITTO (AV)

COD. INTERNO

DESCRIZIONE

EO-VAL-PD-SIA-12

STUDIO DELLA GITTATA DEGLI ELEMENTI ROTANTI

PROGETTAZIONE:



80128 Napol - via San Giacomo dei Capri, 38
Tel/Fax 081.5797998 E-mail: inse.srl@virgilio.it



REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO	REVISIONE
Geom. D. Sgambati	P.e. F. Di Maso	Ing. N. Galdero	Revisione 0
			DATA
			02/2020

SOMMARIO

1. PREMESSA.....	2
2. DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO	2
3. IPOTESI DI CALCOLO	2
3.1 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA.....	3
4. GITTATA MASSIMA.....	4
4.1 CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA	6
4.2 CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA.....	6

1. PREMESSA

Con riferimento alle Linee Guida regionali per lo svolgimento del procedimento unico di cui all'art.12 del D.Lgs 387/03 per l'Autorizzazione alla costruzione ed all'esercizio di impianti di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili, approvate con Delibera di Giunta Regionale n. 621/2011 e s. m. i , è necessario calcolare la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale.

Questo documento riporta lo studio realizzato per il calcolo della gittata massima dei frammenti rotanti, con riferimento alla tecnologia utilizzata nel progetto del parco eolico di San Marco dei Cavoti della Società Valva Energia Srl.

Lo studio viene redatto applicando una metodologia di calcolo che abbia rigore scientifico e considerando tutti i possibili effetti meccanici ed aerodinamici che possono in qualche modo influenzare la distanza di gittata della pala.

Nel calcolo, si ipotizza per ragioni cautelative l'applicazione delle condizioni peggiori in cui si possa verificare il distacco della pala dell'aerogeneratore. In particolare, per causa delle caratteristiche costruttive degli aerogeneratori, la pala che accidentalmente si distacca dal rotore viene messa in moto dalla forza centrifuga determinata dalla rotazione del rotore stesso, con una velocità iniziale V_0 proporzionale alla velocità di rotazione del rotore.

2. DESCRIZIONE E LOCALIZZAZIONE DELL'IMPIANTO

L'impianto eolico in oggetto consta di N.7 aerogeneratori della potenza nominale di 4,3 MW per una potenza complessiva di 30,1 MW da ubicare nel Comune di Valva (SA), in località Valle di Porto, Serra Moretta, Cesaria, Bosco, Piano di Salici, Cerreta, Le Tempe e Prati Delia.

L'aerogeneratore, scelto in fase progettuale è un aerogeneratore da 4,3 MW con rotore pari a 136 m e altezza Hub (torre) pari a 82 metri per un totale di 150 m.

3. IPOTESI DI CALCOLO

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo della gittata massima sono le più gravose possibili in modo da giungere a risultati sicuramente cautelativi.

Per il calcolo della massima gittata si considerano le seguenti ipotesi:

- Il moto del sistema considerato è quello di un sistema rigido non vincolato (modello che approssima la pala nel momento del distacco);
- Il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo ϑ ;
- La velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo sono i seguenti.

- Altezza della torre $H = 82$ m
- Diametro del rotore $D = 136$ m
- Velocità di rotazione $V = 12$ giri/min. 11,7

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.

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).

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 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.

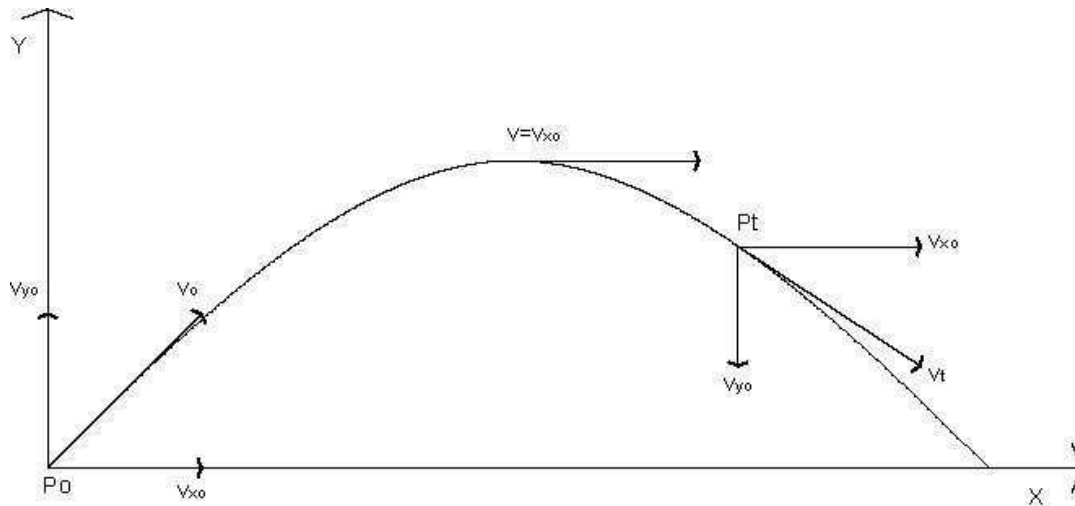
3.1 STUDIO DEL MOTO DEL PROIETTILE MEDIANTE LE EQUAZIONI DELLA CINEMATICA

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.

Sceglieremo 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:

$$a_x = 0 \qquad a_y = -g$$

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:

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

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:

$$v_x = v_{x0} \quad x = x_0 + v_{x0}t$$

e

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

4. 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 $r_g = 22,67 \text{ m}$ essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 68 m .

Di conseguenza l'altezza di lancio sarà uguale a:

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

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.

4.1 CALCOLO DELLA VELOCITÀ PERIFERICA

La velocità angolare media w 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 w 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 $2\pi r n$ 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 12 giri al minuto), corrisponde a:

$$V_g = \omega r_g = \frac{2\pi n}{60} r_g = 28,47 \text{ m/sec}$$

4.2 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_0 è uguale a 28,47 m/sec.
- Le coordinate del punto di partenza del corpo, non saranno (0,0) coincidenti con l'origine degli assi ma $(0, HG = H_{torre} + Yg)$ ossia le coordinate del baricentro G di una pala.

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

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

Al valore di gittata massima andrà aggiunta la distanza Xg 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 $Lg = 45,33 \text{ m}$.

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 (°)	θ (rad)	Vx	Vy	Hg	Gt	Xg	Lg	Ge
0	0,00	28,47	0,00	80,00	114,98	22,67	45,33	160,31
1	0,02	28,47	0,50	80,40	116,69	22,66	45,33	162,02
2	0,03	28,45	0,99	80,79	118,39	22,65	45,33	163,72
3	0,05	28,43	1,49	81,19	120,07	22,64	45,33	165,40
4	0,07	28,40	1,99	81,58	121,72	22,61	45,33	167,05
5	0,09	28,36	2,48	81,98	123,34	22,58	45,33	168,67
6	0,10	28,31	2,98	82,37	124,94	22,54	45,33	170,27
7	0,12	28,26	3,47	82,76	126,50	22,50	45,33	171,83
8	0,14	28,19	3,96	83,15	128,03	22,45	45,33	173,36
9	0,16	28,12	4,45	83,55	129,52	22,39	45,33	174,85
10	0,17	28,04	4,94	83,94	130,97	22,32	45,33	176,30
11	0,19	27,95	5,43	84,33	132,38	22,25	45,33	177,71
12	0,21	27,85	5,92	84,71	133,75	22,17	45,33	179,08
13	0,23	27,74	6,40	85,10	135,07	22,09	45,33	180,40
14	0,24	27,62	6,89	85,48	136,34	21,99	45,33	181,67
15	0,26	27,50	7,37	85,87	137,56	21,89	45,33	182,89
16	0,28	27,37	7,85	86,25	138,72	21,79	45,33	184,05
17	0,30	27,23	8,32	86,63	139,83	21,68	45,33	185,16
18	0,31	27,08	8,80	87,00	140,88	21,56	45,33	186,21
19	0,33	26,92	9,27	87,38	141,86	21,43	45,33	187,19
20	0,35	26,75	9,74	87,75	142,79	21,30	45,33	188,12
21	0,37	26,58	10,20	88,12	143,64	21,16	45,33	188,97
22	0,38	26,40	10,67	88,49	144,43	21,02	45,33	189,76
23	0,40	26,21	11,12	88,86	145,15	20,86	45,33	190,48
24	0,42	26,01	11,58	89,22	145,80	20,71	45,33	191,13
25	0,44	25,80	12,03	89,58	146,37	20,54	45,33	191,70
26	0,45	25,59	12,48	89,94	146,86	20,37	45,33	192,19
27	0,47	25,37	12,93	90,29	147,27	20,20	45,33	192,60
28	0,49	25,14	13,37	90,64	147,61	20,01	45,33	192,94
29	0,51	24,90	13,80	90,99	147,86	19,82	45,33	193,19
30	0,52	24,66	14,24	91,33	148,02	19,63	45,33	193,35
31	0,54	24,40	14,66	91,67	148,11	19,43	45,33	193,44
32	0,56	24,14	15,09	92,01	148,10	19,22	45,33	193,43
33	0,58	23,88	15,51	92,35	148,00	19,01	45,33	193,33
34	0,59	23,60	15,92	92,68	147,82	18,79	45,33	193,15
35	0,61	23,32	16,33	93,00	147,54	18,57	45,33	192,87
36	0,63	23,03	16,73	93,32	147,17	18,34	45,33	192,50
37	0,65	22,74	17,13	93,64	146,70	18,10	45,33	192,03
38	0,66	22,43	17,53	93,95	146,14	17,86	45,33	191,47
39	0,68	22,13	17,92	94,26	145,48	17,62	45,33	190,81
40	0,70	21,81	18,30	94,57	144,73	17,36	45,33	190,06
41	0,72	21,49	18,68	94,87	143,88	17,11	45,33	189,21
42	0,73	21,16	19,05	95,17	142,93	16,84	45,33	188,26
43	0,75	20,82	19,42	95,46	141,89	16,58	45,33	187,22
44	0,77	20,48	19,78	95,75	140,74	16,31	45,33	186,07

45	0,79	20,13	20,13	96,03	139,50	16,03	45,33	184,83
46	0,80	19,78	20,48	96,31	138,16	15,75	45,33	183,49
47	0,82	19,42	20,82	96,58	136,72	15,46	45,33	182,05
48	0,84	19,05	21,16	96,84	135,18	15,17	45,33	180,51
49	0,86	18,68	21,49	97,11	133,54	14,87	45,33	178,87
50	0,87	18,30	21,81	97,36	131,80	14,57	45,33	177,13
51	0,89	17,92	22,13	97,62	129,97	14,26	45,33	175,30
52	0,91	17,53	22,43	97,86	128,04	13,95	45,33	173,37
53	0,93	17,13	22,74	98,10	126,02	13,64	45,33	171,35
54	0,94	16,73	23,03	98,34	123,89	13,32	45,33	169,22
55	0,96	16,33	23,32	98,57	121,68	13,00	45,33	167,01
56	0,98	15,92	23,60	98,79	119,37	12,68	45,33	164,70
57	0,99	15,51	23,88	99,01	116,97	12,35	45,33	162,30
58	1,01	15,09	24,14	99,22	114,48	12,01	45,33	159,81
59	1,03	14,66	24,40	99,43	111,90	11,67	45,33	157,23
60	1,05	14,24	24,66	99,63	109,23	11,33	45,33	154,56
61	1,06	13,80	24,90	99,82	106,48	10,99	45,33	151,81
62	1,08	13,37	25,14	100,01	103,64	10,64	45,33	148,97
63	1,10	12,93	25,37	100,20	100,72	10,29	45,33	146,05
64	1,12	12,48	25,59	100,37	97,72	9,94	45,33	143,05
65	1,13	12,03	25,80	100,54	94,65	9,58	45,33	139,98
66	1,15	11,58	26,01	100,71	91,49	9,22	45,33	136,82
67	1,17	11,12	26,21	100,86	88,26	8,86	45,33	133,59
68	1,19	10,67	26,40	101,02	84,97	8,49	45,33	130,30
69	1,20	10,20	26,58	101,16	81,60	8,12	45,33	126,93
70	1,22	9,74	26,75	101,30	78,16	7,75	45,33	123,49
71	1,24	9,27	26,92	101,43	74,66	7,38	45,33	119,99
72	1,26	8,80	27,08	101,56	71,10	7,00	45,33	116,43
73	1,27	8,32	27,23	101,68	67,49	6,63	45,33	112,82
74	1,29	7,85	27,37	101,79	63,81	6,25	45,33	109,14
75	1,31	7,37	27,50	101,89	60,08	5,87	45,33	105,41
76	1,33	6,89	27,62	101,99	56,31	5,48	45,33	101,64
77	1,34	6,40	27,74	102,09	52,48	5,10	45,33	97,81
78	1,36	5,92	27,85	102,17	48,62	4,71	45,33	93,95
79	1,38	5,43	27,95	102,25	44,71	4,33	45,33	90,04
80	1,40	4,94	28,04	102,32	40,77	3,94	45,33	86,10
81	1,41	4,45	28,12	102,39	36,79	3,55	45,33	82,12
82	1,43	3,96	28,19	102,45	32,78	3,15	45,33	78,11
83	1,45	3,47	28,26	102,50	28,74	2,76	45,33	74,07
84	1,47	2,98	28,31	102,54	24,68	2,37	45,33	70,01
85	1,48	2,48	28,36	102,58	20,60	1,98	45,33	65,93
86	1,50	1,99	28,40	102,61	16,50	1,58	45,33	61,83
87	1,52	1,49	28,43	102,64	12,39	1,19	45,33	57,72
88	1,54	0,99	28,45	102,65	8,26	0,79	45,33	53,59
89	1,55	0,50	28,47	102,66	4,13	0,40	45,33	49,46
90	1,57	0,00	28,47	102,67	0,00	0,00	45,33	45,33

Dall'analisi della gittata si ottiene che la massima distanza percorsa dal baricentro dell'elemento si ottiene per un angolo θ intorno a 30° con un valore di gittata pari a circa 148 metri circa.

Le ipotesi teoriche di calcolo determinano il valore ultimo espresso d , trascurando l'effetto aerodinamico che oltretutto indurrebbe nella pala un moto rototraslatorio combinato, derivante dall'azione centrifuga di espulsione, dall'avvolgimento sul proprio asse che si induce nella pala espulsa a causa del suo stesso profilo e dalla azione del vento ortogonale al piano che contiene la circonferenza di rotazione delle pale. Pertanto il moto derivante andrebbe studiato nella sua evoluzione 3D anziché nel piano; tuttavia la semplificazione introdotta dal modello 2D adottato è a vantaggio di sicurezza per quanto riguarda la gittata massima, non avendo considerato l'effetto dell'attrito viscoso dell'aria. Per conseguenza il valore definitivo determinato risulta circa : $d = 180$ m.

Riportando uno studio della BP POWER nel "Blade throw calculation under normal operating" "esperienze basate su dati reali (su una casistica di 1578 casi) fino all'agosto del 2006 hanno dimostrato che nel caso di distacco della pala o parti di essa l'unico moto che si è registrato è stato un moto di completa rotazione e che le distanze percorse lungo il moto sono risultate sempre inferiori alle lunghezze riportate nella relazione. Il distacco delle parti, in genere piccole, dovuto a guasti causati da eventi eccezionali (quali la straordinaria energia prodotta da un fulmine) ha portato nel peggiore dei casi, a ritrovare le parti stesse a distanze non superiori ai 40-50 metri dalla base della torre".

In conclusione:

- la massima gittata degli elementi rotanti che possono essere proiettati dagli aerogeneratori in progetto è certamente inferiore a 180 metri;
- Rispetto agli aerogeneratori non esistono edifici abitati nel buffer di 180 metri come si evidenzia in cartografia catastale allegata e da planimetria dell'impianto su carta tecnica regionale 1:5000
- Nel buffer di 180 metri dalle turbine si presentano i seguenti manufatti: WTG 1 sono presenti edifici rurali non abitati, utilizzati per il ricovero attrezzature; WTG 04 si rileva la presenza a 170 m di una linea elettrica; MT; WTG 05 si rileva la presenza di un edificio diroccato; WTG 06 si rileva la presenza di un piccolo edificio deposito agricolo.