

TITOLARE DEL DOCUMENTO:

AREN ELECTRIC POWER SPA

Sede legale e amministrativa: Via Dell'Arrigoni, 308 – 47522 – Cesena (FC)
Codice Fiscale e P. IVA 03803880404

COMUNE DI CALITRI E BISACCIA (AV)
LOCALITA' PIANI SAN PIETRO

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI **IMPIANTO EOLICO** **“PIANI SAN PIETRO”**

REDAZIONE / PROGETTISTA:



AREN Electric Power S.p.A.
Società per Azioni con Unico Socio
Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC)
Ph. +39 0547 415245 - Fax +39 0547 415274
Web: www.aren-ep.com

TIMBRO E FIRMA PROGETTISTA:

Ing. Samuele Ulivi Ordine degli
Ingegneri di Forlì-Cesena – matr.
2866

TITOLO ELABORATO:

RELAZIONE DI CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

CODICE ELABORATO:

CLTDT_GENR03800_00

FORMATO:

A4

Nr. EL.:

/

FASE:

**PROGETTO
DEFINITIVO**

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
00	Prima emissione	10/06/2022	S. Varuzza	F. Piccinini	L. Masini
01					
02					
03					
04					

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 1 di 11

1	Introduzione	2
2	Ipotesi di calcolo	2
3	Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo.....	3
3.1	Dati geometrici e cinematici dell'aerogeneratore	3
3.2	Schema concettuale.....	3
3.3	Calcolo del baricentro	4
3.4	Calcolo della velocità periferica	4
3.5	Calcolo di H_g	4
3.6	Calcolo della gittata massima ed effettiva	4
4	Applicazione dello studio al progetto in esame.....	8
5	Conclusioni.....	11

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 2 di 11

1 Introduzione

Il progetto in oggetto consiste nella realizzazione di un impianto di produzione di energia elettrica mediante lo sfruttamento del vento, da ubicarsi nei Comuni di Calitri e Bisaccia (AV), proposto dalla società Aren Electric Power Spa.

L'impianto è costituito da n. 16 aerogeneratori (modello Vestas diametro 150 altezza hub 105 m) localizzati in località Piani San Pietro, di potenza unitaria 6 MW, per una potenza complessiva dell'impianto di 96 MW.

L'intero impianto, comprese le opere di connessione, è ubicato all'interno dei Comuni di Calitri e Bisaccia.

La presente relazione si riferisce al calcolo della gittata massima di una pala di un aerogeneratore del modello Vestas, diametro 150 m, altezza hub 105 m e potenza 6 MW, in caso di rottura; tale calcolo è stato eseguito al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare danno a cose e/o persone. Nel calcolo si ipotizza il distacco della pala nel punto di serraggio sul mozzo, punto di maggiore sollecitazione, per effetto di intaglio dovuto al collegamento.

Lo studio riporta inoltre il calcolo della gittata nell'ipotesi di una rottura dell'intera pala.

Con riferimento al distacco del frammento e all'angolo di maggiore gittata, si riportano i passaggi del calcolo della gittata al fine di giustificare il valore ottenuto che sono stati svolti in conformità al decreto dirigenziale n. 44 del 12/02/2021 vigente nella regione Campania.

2 Ipotesi di calcolo

Le condizioni al contorno considerate per il calcolo sono le più gravose e consentono di giungere a risultati cautelativi; si vuole precisare, inoltre, che le probabilità di accadimento di rotture per aerogeneratori industriali di grande taglia sono molto basse.

Per il calcolo si effettuano 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);
- tutte le forze di resistenza generate dal mezzo (aria) in cui avviene il moto in grado di ridurre la gittata effettiva non vengono considerate;
- il calcolo della gittata è stato determinato per diversi valori dell'angolo α ;
- la velocità massima del rotore sarà limitata elettronicamente.

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 3 di 11

3 Calcolo della gittata nel caso di distacco nel punto di attacco del mozzo

3.1 Dati geometrici e cinematici dell'aerogeneratore

I dati geometrici e cinematici sui quali è basato il calcolo (*Figura 1*) sono i seguenti:

- Altezza della torre $H = 105$ m
- Diametro del rotore $D = 150$ m
- Lunghezza della pala $L = 73,65$ m
- Altezza massima dell'aerogeneratore $H+L = 178,65$ m
- Velocità di rotazione $n = 12,6$ giri/min.

3.2 Schema concettuale

In conformità al decreto dirigenziale n. 44 del 12/02/2021 della regione Campania viene riportato lo schema adottato per il calcolo della gittata per un angolo compreso tra 0° e 90° , che risulta come segue:

α : Angolo della pala rispetto all'orizzontale

L : Lunghezza della pala

D : Diametro del rotore

r_g : Posizione del baricentro

X_g : Posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre

Y_g : Proiezione di r_g sulla verticale

$\frac{2}{3}L$: Frazione della pala che supera la gittata teorica

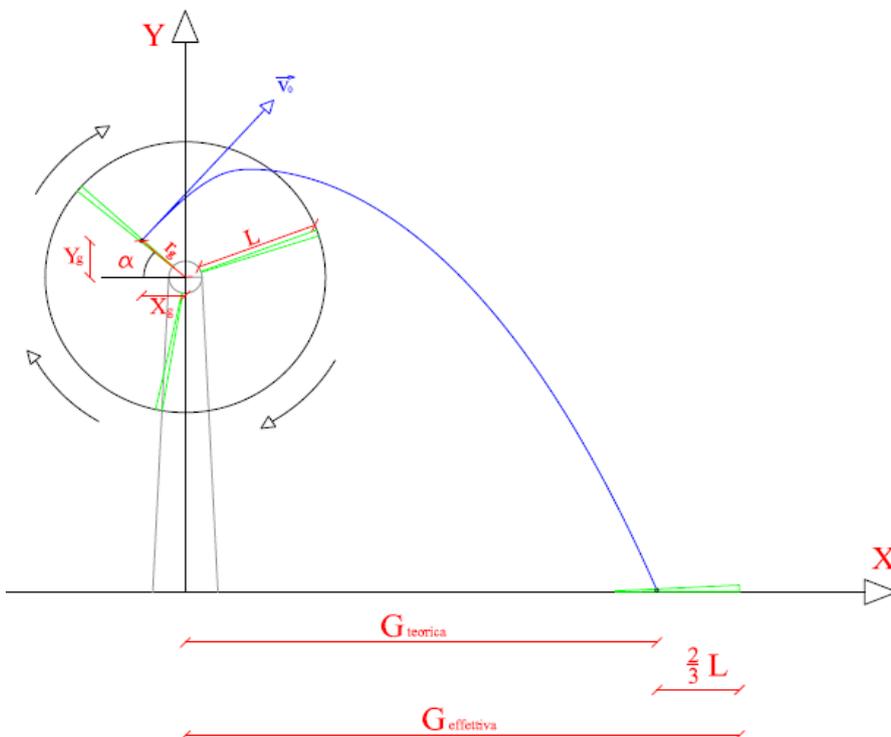


Figura 1: Schema adottato per il calcolo della gittata

Prima del calcolo della gittata è necessario calcolare i parametri che compaiono nella formula fornita dal decreto.

AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale: Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC), Italia

Ph. +39 0547 415245 - email: areaenergia@legalmail.it

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì - Cesena Part. Iva 03803880404



AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 4 di 11

3.3 Calcolo del baricentro

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si può ritenere con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala (L) più il raggio del rotore (D).

$$r_g = \frac{D}{2} - L + \frac{L}{3} = 25,90m$$

3.4 Calcolo della velocità periferica

La velocità angolare media ω è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare e 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, ovvero la velocità angolare ω del corpo in movimento. Il dato di partenza è $n = 12,6$ giri/min che corrisponde ad una velocità angolare:

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = 1,32 \frac{rad}{s}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro il punto G di raggio R percorre la circonferenza $2 \cdot \pi \cdot R$; dopo n giri al minuto lo spazio percorso sarà $2 \cdot \pi \cdot R \cdot n$ metri/minuto. 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 pari a 12,6 giri al minuto), corrisponde a:

$$v_0 = \omega \cdot r_g = \frac{2\pi n}{60} \cdot r_g = 34,17 \frac{m}{s}$$

3.5 Calcolo di H_g

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 più il raggio del rotore, ossia $r_g = 25,95$ m, essendo la lunghezza di ciascuna pala uguale a 73,65 m e il diametro del rotore uguale 150 m.

Di conseguenza l'altezza di lancio (H_g) sarà uguale all'altezza del mozzo più il valore della proiezione di r_g (posizione del baricentro) sulla verticale ossia:

$$H_g = H_{hub} + Y_g$$

$$\text{con } Y_g = (r_g \cdot \sin \alpha)$$

dove H_{hub} è l'altezza del mozzo.

Il calcolo della proiezione del baricentro sull'asse verticale, viene valutato per i diversi valori dell'angolo α .

3.6 Calcolo della gittata massima ed effettiva

Per il calcolo della gittata massima ed effettiva vengono riportate le formule “tal quale” fornite dal decreto, così scritte:

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 5 di 11

G: Gittata massima

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

Dove **g** rappresenta l'effetto della forza gravitazionale della Terra pari a 9,81 m/s², mentre **v_{x0}** e **v_{y0}** rappresentano la velocità nelle due direzioni x e y in funzione dell'angolo α , che vengono calcolate come:

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

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

X_g, come già menzionato, rappresenta la posizione del baricentro della pala rispetto all'asse della torre e che viene calcolata come:

$$X_g = r_g \cos \alpha$$

G_{eff}: Gittata effettiva

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

Lg rappresenta la frazione della pala che, nella casistica peggiore, supera la gittata massima qualora venga raggiunto dal baricentro (**r_g**) e che viene calcolato come:

$$Lg = \frac{2}{3}L$$

Il calcolo della gittata è stato eseguito considerando diversi valori dell'angolo α . La *Tabella 1* mostra i valori ottenuti della gittata (i valori costanti come, ad esempio, i parametri dell'aerogeneratore e la velocità **v₀** riportati precedentemente sono stati omessi da quest'ultima per una lettura più fluida):

Tabella 1. Calcolo della gittata massima ed effettiva con diversi valori dell'angolo α

Angolo α	vx0	vy0	Hg	Gittata Teorica	Xg	Lg	Gittata Effettiva
0	0,00	34,17	105,00	-25,90	25,90	49,10	23,20
1	0,60	34,17	105,45	-20,36	25,90	49,10	28,74
2	1,19	34,15	105,90	-14,81	25,88	49,10	34,29
3	1,79	34,13	106,36	-9,25	25,86	49,10	39,85
4	2,38	34,09	106,81	-3,68	25,84	49,10	45,42
5	2,98	34,04	107,26	1,88	25,80	49,10	50,98
6	3,57	33,99	107,71	7,44	25,76	49,10	56,54
7	4,16	33,92	108,16	12,98	25,71	49,10	62,08
8	4,76	33,84	108,60	18,51	25,65	49,10	67,61
9	5,35	33,75	109,05	24,02	25,58	49,10	73,12
10	5,93	33,66	109,50	29,50	25,51	49,10	78,60
11	6,52	33,55	109,94	34,96	25,42	49,10	84,06
12	7,11	33,43	110,38	40,38	25,33	49,10	89,48
13	7,69	33,30	110,83	45,76	25,24	49,10	94,86

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 6 di 11

Angolo α	vx0	vy0	Hg	Gittata Teorica	Xg	Lg	Gittata Effettiva
14	8,27	33,16	111,27	51,10	25,13	49,10	100,20
15	8,84	33,01	111,70	56,39	25,02	49,10	105,49
16	9,42	32,85	112,14	61,63	24,90	49,10	110,73
17	9,99	32,68	112,57	66,82	24,77	49,10	115,92
18	10,56	32,50	113,00	71,95	24,63	49,10	121,05
19	11,13	32,31	113,43	77,01	24,49	49,10	126,11
20	11,69	32,11	113,86	82,01	24,34	49,10	131,11
21	12,25	31,90	114,28	86,93	24,18	49,10	136,03
22	12,80	31,69	114,70	91,78	24,01	49,10	140,88
23	13,35	31,46	115,12	96,55	23,84	49,10	145,65
24	13,90	31,22	115,53	101,25	23,66	49,10	150,35
25	14,44	30,97	115,95	105,85	23,47	49,10	154,95
26	14,98	30,72	116,35	110,37	23,28	49,10	159,47
27	15,51	30,45	116,76	114,80	23,08	49,10	163,90
28	16,04	30,17	117,16	119,13	22,87	49,10	168,23
29	16,57	29,89	117,56	123,36	22,65	49,10	172,46
30	17,09	29,60	117,95	127,50	22,43	49,10	176,60
31	17,60	29,29	118,34	131,53	22,20	49,10	180,63
32	18,11	28,98	118,72	135,46	21,96	49,10	184,56
33	18,61	28,66	119,11	139,28	21,72	49,10	188,38
34	19,11	28,33	119,48	143,00	21,47	49,10	192,10
35	19,60	27,99	119,86	146,60	21,22	49,10	195,70
36	20,09	27,65	120,22	150,09	20,95	49,10	199,19
37	20,57	27,29	120,59	153,47	20,68	49,10	202,57
38	21,04	26,93	120,95	156,73	20,41	49,10	205,83
39	21,51	26,56	121,30	159,87	20,13	49,10	208,97
40	21,97	26,18	121,65	162,89	19,84	49,10	211,99
41	22,42	25,79	121,99	165,80	19,55	49,10	214,90
42	22,87	25,40	122,33	168,58	19,25	49,10	217,68
43	23,31	24,99	122,66	171,24	18,94	49,10	220,34
44	23,74	24,58	122,99	173,79	18,63	49,10	222,89
45	24,16	24,16	123,31	176,21	18,31	49,10	225,31
46	24,58	23,74	123,63	178,50	17,99	49,10	227,60
43	23,31	24,99	122,66	171,24	18,94	49,10	220,34
44	23,74	24,58	122,99	173,79	18,63	49,10	222,89
45	24,16	24,16	123,31	176,21	18,31	49,10	225,31
46	24,58	23,74	123,63	178,50	17,99	49,10	227,60
47	24,99	23,31	123,94	180,68	17,66	49,10	229,78
48	25,40	22,87	124,25	182,73	17,33	49,10	231,83

AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale: Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC), Italia

Ph. +39 0547 415245 - email: areaenergia@legalmail.it

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì - Cesena Part. Iva 03803880404



AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico "Piani San Pietro"	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 7 di 11

Angolo α	vx0	vy0	Hg	Gittata Teorica	Xg	Lg	Gittata Effettiva
49	25,79	22,42	124,55	184,66	16,99	49,10	233,76
50	26,18	21,97	124,84	186,47	16,65	49,10	235,57
51	26,56	21,51	125,13	188,16	16,30	49,10	237,26
52	26,93	21,04	125,41	189,72	15,95	49,10	238,82
53	27,29	20,57	125,68	191,17	15,59	49,10	240,27
54	27,65	20,09	125,95	192,49	15,22	49,10	241,59
55	27,99	19,60	126,22	193,70	14,86	49,10	242,80
56	28,33	19,11	126,47	194,79	14,48	49,10	243,89
57	28,66	18,61	126,72	195,77	14,11	49,10	244,87
58	28,98	18,11	126,96	196,63	13,72	49,10	245,73
59	29,29	17,60	127,20	197,38	13,34	49,10	246,48
60	29,60	17,09	127,43	198,02	12,95	49,10	247,12
61	29,89	16,57	127,65	198,54	12,56	49,10	247,64
62	30,17	16,04	127,87	198,96	12,16	49,10	248,06
63	30,45	15,51	128,08	199,28	11,76	49,10	248,38
64	30,72	14,98	128,28	199,49	11,35	49,10	248,59
65	30,97	14,44	128,47	199,59	10,95	49,10	248,69
66	31,22	13,90	128,66	199,60	10,53	49,10	248,70
67	31,46	13,35	128,84	199,51	10,12	49,10	248,61
68	31,69	12,80	129,01	199,33	9,70	49,10	248,43
69	31,90	12,25	129,18	199,05	9,28	49,10	248,15
70	32,11	11,69	129,34	198,69	8,86	49,10	247,79
71	32,31	11,13	129,49	198,23	8,43	49,10	247,33
72	32,50	10,56	129,63	197,70	8,00	49,10	246,80
73	32,68	9,99	129,77	197,07	7,57	49,10	246,17
74	32,85	9,42	129,90	196,37	7,14	49,10	245,47
75	33,01	8,84	130,02	195,60	6,70	49,10	244,70
76	33,16	8,27	130,13	194,74	6,27	49,10	243,84
77	33,30	7,69	130,24	193,82	5,83	49,10	242,92
78	33,43	7,11	130,33	192,83	5,38	49,10	241,93
79	33,55	6,52	130,42	191,77	4,94	49,10	240,87
80	33,66	5,93	130,51	190,65	4,50	49,10	239,75
81	33,75	5,35	130,58	189,47	4,05	49,10	238,57
82	33,84	4,76	130,65	188,23	3,60	49,10	237,33
83	33,92	4,16	130,71	186,93	3,16	49,10	236,03
84	33,99	3,57	130,76	185,58	2,71	49,10	234,68
85	34,04	2,98	130,80	184,19	2,26	49,10	233,29
86	34,09	2,38	130,84	182,74	1,81	49,10	231,84
87	34,13	1,79	130,86	181,25	1,36	49,10	230,35

AREN Electric Power S.p.A.

Sede legale: Via dell'Arrigoni n. 308 - 47522 Cesena (FC), Italia

 Ph. +39 0547 415245 - email: areaenergia@legalmail.it

Codice Fiscale, P. IVA e numero di iscrizione al Registro delle Imprese di Forlì - Cesena Part. Iva 03803880404



AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 8 di 11

Angolo α	vx0	vy0	Hg	Gittata Teorica	Xg	Lg	Gittata Effettiva
88	34,15	1,19	130,88	179,72	0,90	49,10	228,82
89	34,17	0,60	130,90	178,15	0,45	49,10	227,25
90	34,17	0,00	130,90	176,54	0,00	49,10	225,64

La gittata massima si ottiene per $\alpha=66^\circ$ ed il risultato numerico è pari a **199,60 m**; questo valore rappresenta il valore della gittata massima teorica per il distacco in corrispondenza del mozzo.

Noto il valore di gittata massima teorica e date le caratteristiche geometriche della pala, precedentemente valutate, si può calcolare la gittata massima effettiva.

Supponendo di prendere in considerazione l'ipotesi più gravosa, ossia quella in cui la pala cadendo si disponga con la parte più lontana dal baricentro verso l'esterno, si ottiene che la gittata massima effettiva è pari al valore massimo di gittata teorica + Lg, ovvero i 2/3 della lunghezza della pala che risulta quindi:

- Punto massima caduta: $199,60 + 49,10 = \mathbf{248,70\ m}$

4 Applicazione dello studio al progetto in esame

Nel progetto in esame si prevede la realizzazione di 16 aerogeneratori del modello Vestas con diametro 150 m e altezza mozzo 105 m localizzati in località Piani San Pietro, di potenza unitaria 6 MW, per una potenza complessiva dell'impianto di 96 MW.

Il calcolo della gittata massima appena descritto mostra come tale valore, nel caso maggiormente cautelativo, si attesti a 248,70 m.

È stata considerata una distanza di 249 m da ogni aerogeneratore e dalle immagini sottostanti (*Figura 2; Figura 3; Figura 4*) emerge che le strade principali e le abitazioni si trovano oltre tale distanza.

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 9 di 11

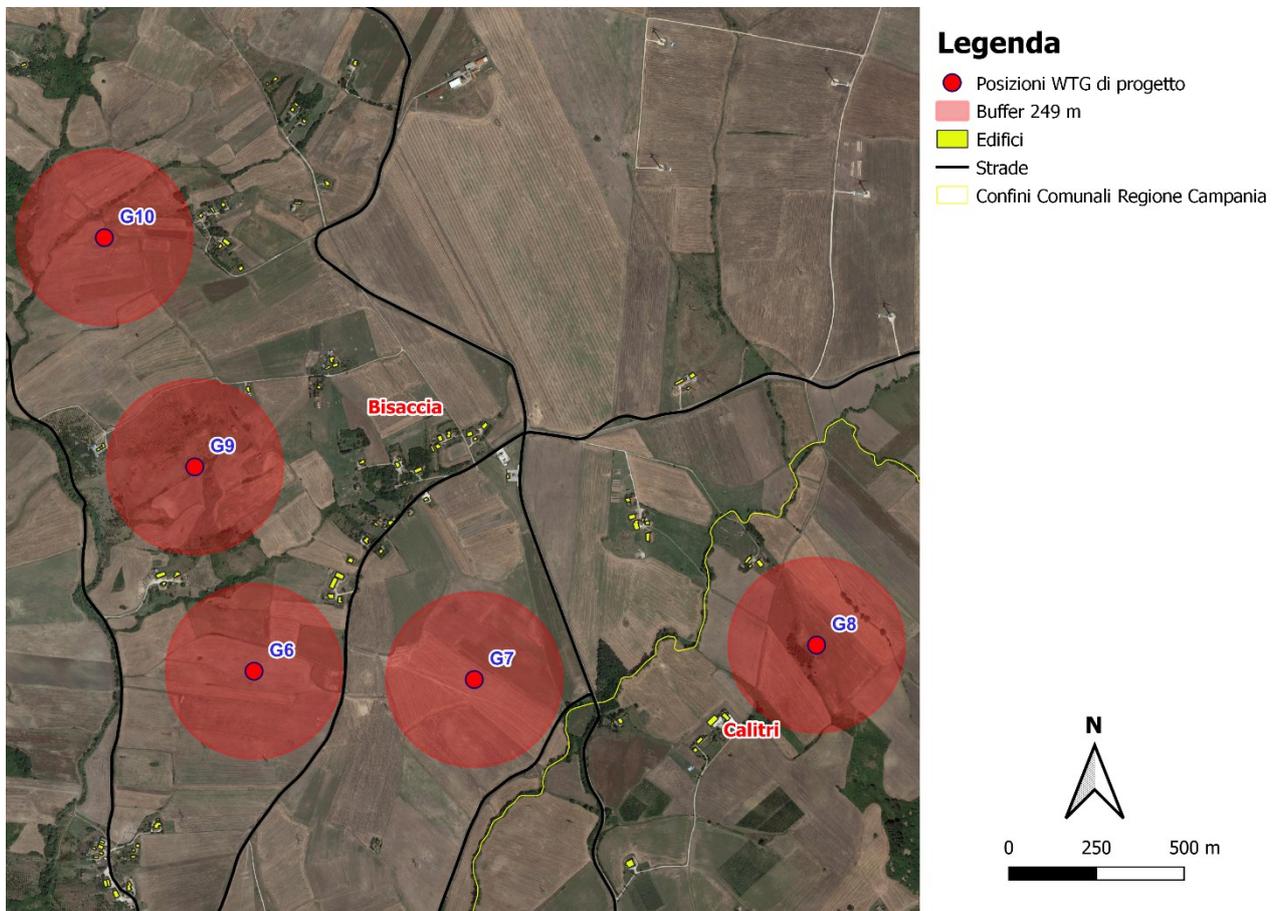


Figura 2. Ubicazione degli aerogeneratori rispetto a strade ed edifici. Gruppo 1

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 10 di 11

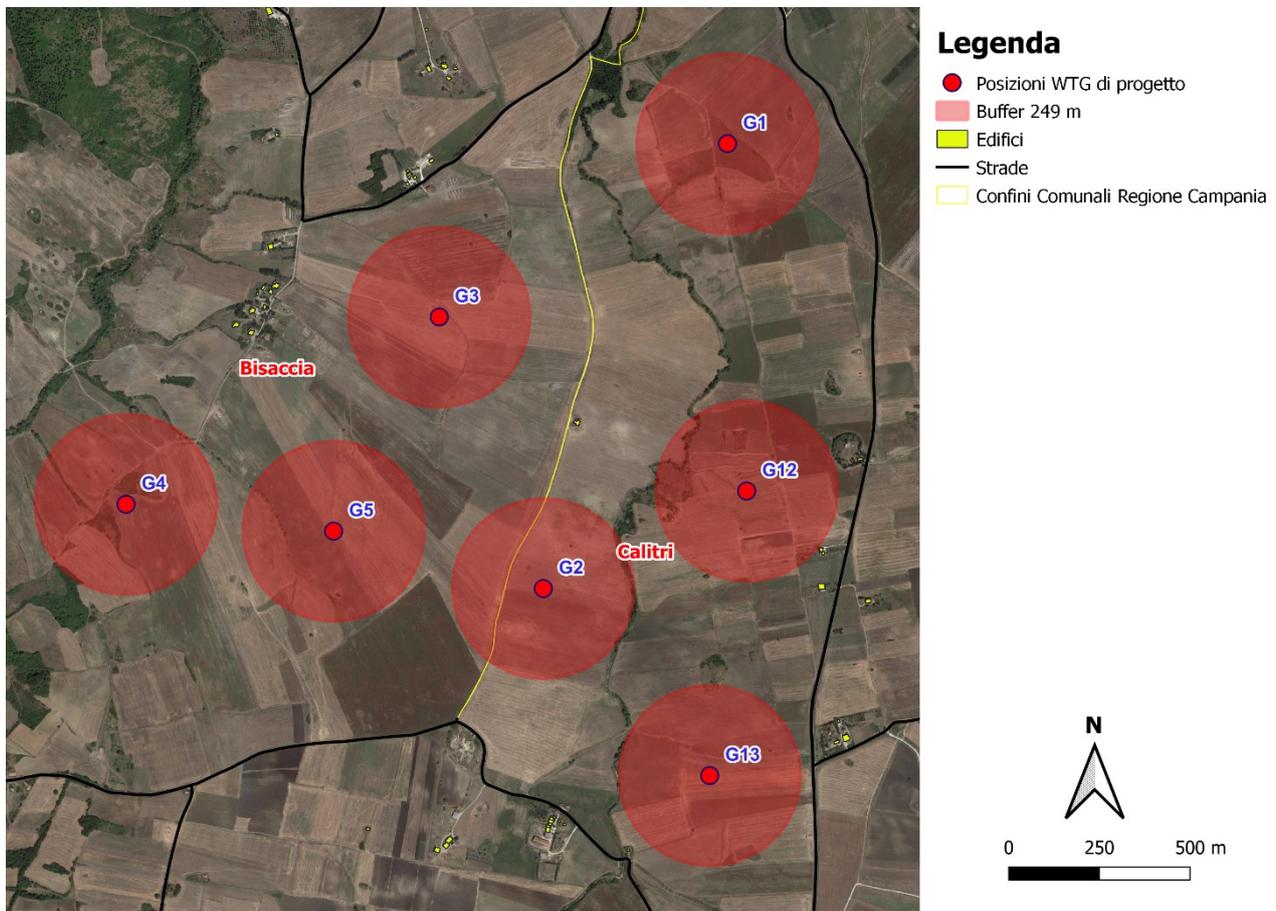


Figura 3. Ubicazione degli aerogeneratori rispetto a strade ed edifici. Gruppo 2

AREN ELECTRIC POWER Spa Impianto Eolico “Piani San Pietro”	PROGETTO DEFINITIVO	Codice Elaborato: CLTDT_GENR03800_00
		Data: 29/06/2022
	RELAZIONE SULLA GITTATA MASSIMA	Revisione: 00
		Pagina: 11 di 11

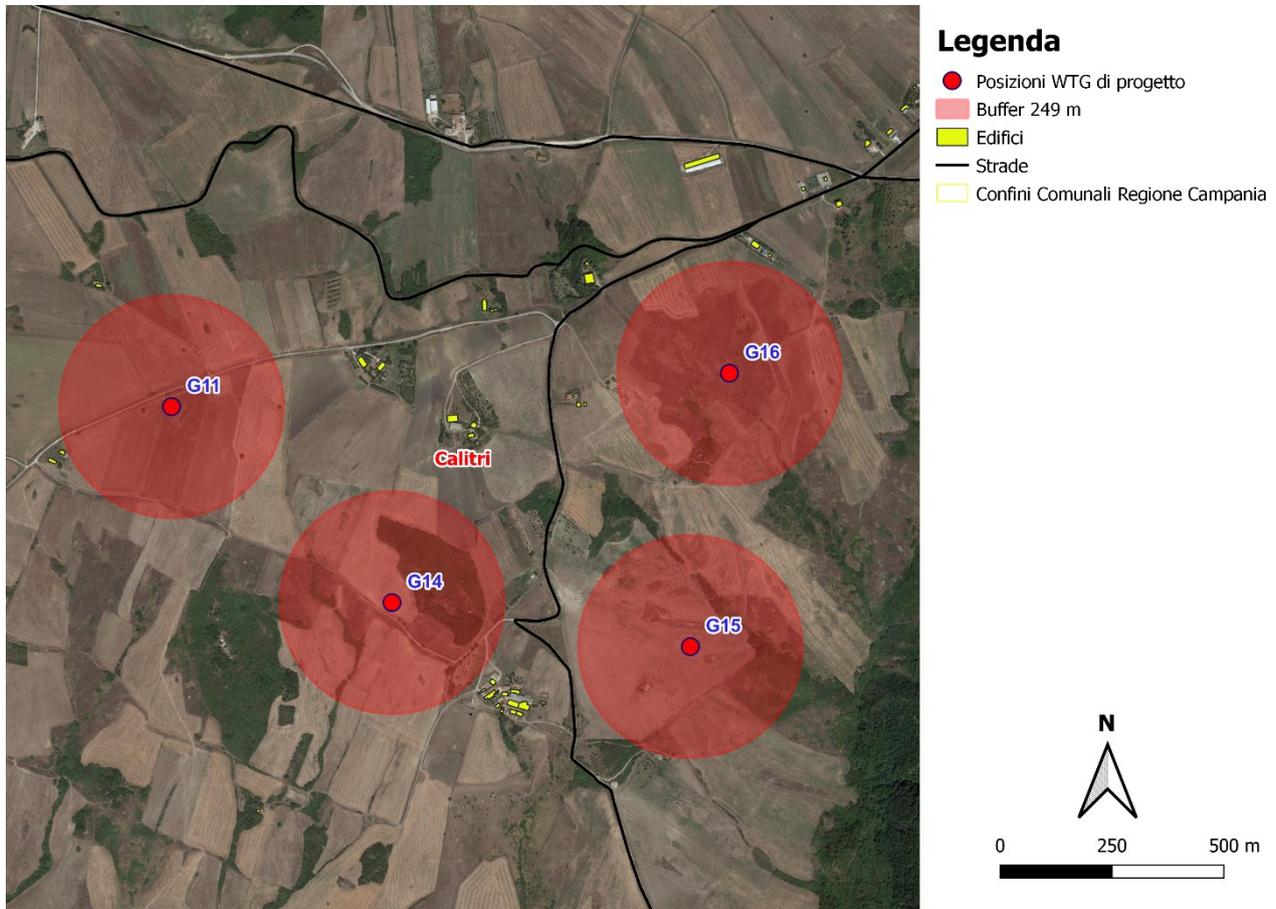


Figura 4. Ubicazione degli aerogeneratori rispetto a strade ed edifici. Gruppo 3

5 Conclusioni

La presente relazione descrive il calcolo eseguito al fine della valutazione della gittata massima che si verifica in caso di rottura accidentale di un aerogeneratore considerando il caso più gravoso. In base a quanto riportato, il punto di caduta più lontano, nel caso di rottura dell'intera pala corrisponde a **199,60 m** per la gittata teorica e a **248,70 m** per la gittata effettiva. I valori di gittata sono stati ottenuti senza considerare le forze resistenti e l'attrito dell'aria, che avrebbero restituito una misurazione della gittata inferiore.

Le distanze degli aerogeneratori di progetto dalle strade provinciali/statali/autostrade e dagli edifici esistenti risultano maggiori ai valori di gittata ottenuti. Si conclude quindi che nell'ipotesi remota di rottura di un aerogeneratore, l'impianto in progetto risulti sicuro.

Si sottolinea che dalla pratica sul campo per questo tipo di impianti, oltre che da studi specialistici pubblicati, il fenomeno della rottura dell'aerogeneratore risulta una eventualità molto remota.

Si conclude, quindi, che il progetto dell'impianto eolico, proposto dalla società Aren Electric Power Spa nel territorio del Comune di Calitri e Bisaccia (AV) in località “Piani San Pietro”, costituito da 16 aerogeneratori del tipo Vestas con diametro 150 m e altezza al mozzo 105 m di potenza unitaria pari a 6 MW, non ostacola la pubblica sicurezza nell'ipotesi remota di rottura di una pala.