

PROPONENTE  
**ESE SALADINO S.R.L.**  
Via Lavaredo, 44/52  
30174 Venezia



PROGETTAZIONE E CORDINAMENTO

**LAAP ARCHITECTS®**  
urban quality consultants

Architetto e Dottore Agrotecnico Antonino Palazzolo

LAAP ARCHITECTS Srl  
via Francesco Laurana 28  
90143 - Palermo - Italy  
t 091.7834427 - fax 091.7834427  
laap.it - info@laap.it

Numero di commessa laap: 383



N° COMMESSA

**1570**

**PARCO EOLICO SALADINO**  
**POTENZA EOLICA 64,8 MW + 41,6 MW SISTEMA DI ACCUMULO**  
**LIBERO CONSORZIO COMUNALE DI AGRIGENTO**  
**IMPIANTO E OPERE DI CONNESSIONE COMUNI DI NARO (AG), CAMASTRA (AG) E LICATA (AG)**

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO

RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

CODICE ELABORATO

**SIA.11**

NOME FILE: 1570\_CART\_elaborato\_r00.dwg

00	31/05/2024	PRIMA EMISSIONE	LAAP ARCHITECTS	Arch. Sandro Di Gangi	Arch. e Agr. Antonino Palazzolo
REV.	DATA	DESCRIZIONE REVISIONE	REDATTO	VERIFICA	APPROVAZIONE

## INDICE

<b>1. PREMESSA</b> .....	<b>3</b>
1.1. Dati Generali di Progetto.....	5
<b>2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE</b> .....	<b>6</b>
<b>3. DESCRIZIONE SINTETICA AEROGENERATORI</b> .....	<b>11</b>
<b>4. LEGGI DEL MOTO PER DETERMINARE LA GITTATA MASSIMA</b> .....	<b>13</b>
<b>5. MODALITA' DI ROTTURA DELLA PALA</b> .....	<b>15</b>
5.1. Rottura della pala alla radice.....	15
5.2. Calcolo della Gittata Massima in caso di rottura alla radice.....	16
5.3. Rottura di frammento .....	19
<b>6. CALCOLO DELLA DISTANZA DI SICUREZZA DEGLI AEROGENERATORI DA STRUTTURE E INFRASTRUTTURE DOVUTO AL CROLLO DELLA TORRE</b> .....	<b>21</b>

## 1. PREMESSA

La società LAAP Architects Srl è stata incaricata di redigere il progetto definitivo del parco eolico denominato “Saladino” composto da nove aerogeneratori, ciascuno di potenza nominale pari a 7,2 MW, per una potenza complessiva di 64,8 MW, e delle opere di rete ubicate nei Comuni di Naro (AG), Camastra (AG) e Licata (AG). Il progetto è proposto dalla società ESE SALADINO SRL con sede legale in Venezia (VE) via Lavaredo 44/52 cap 30174.

Nello specifico si propone la realizzazione di:

1. **Parco eolico con n° 9 aerogeneratori**, il cui modello selezionato avrà potenza nominale di 7,2 MW con altezza al mozzo pari a 125 m, diametro rotore pari a 162 m e altezza massima al vertice della pala pari a 206 m. Questa tipologia di aerogeneratore, allo stato attuale, è quella ritenuta più idonea per il sito di progetto dell’impianto.

L’area interessata dal posizionamento degli aerogeneratori ricade nella contrada Saladino (T1-T2) e nella Contrada Risichittè (T5-T6) nel **Comune di Naro**, nella contrada Campofranco (T3-T7-T8) e nella Contrada Vizzino (T9) nel **Comune di Camastra** e nella Contrada Sottàfari e Marotta nel **Comune di Licata** su aree a destinazione agricola. I terreni sui quali si intende realizzare l’impianto sono tutti di proprietà privata. Il territorio è caratterizzato da un’orografia prevalentemente pianeggiante con la presenza di alcuni rilievi naturali, le posizioni delle macchine vanno da un’altitudine di 63.00 m. slm. a 202.00 m. slm.

Oltre che degli aerogeneratori, il progetto si compone dei seguenti elementi:

2. **Cavidotti interrati 36kV**, ubicati nel comune di Naro (AG), Camastra (AG) e Licata (AG), per il vettoriamento dell’energia elettrica prodotta dal campo eolico fino alla Sottostazione Utente;
3. La **Sottostazione Utente SSEU**, ubicata nel comune di Licata;
4. Una nuova **stazione elettrica SE TERNA** di smistamento con **stallo di trasformazione a 220/150/36 kV**, ubicata nel comune di Licata, da inserire in entra - esce sulla linea RTN a 220 kV “Chiaromonte Gulfi - Favara” con dei nuovi raccordi di progetto;

Secondo le indicazioni del D.L 199/2021 al comma 8 dell’art. 20 che disciplina l’individuazione di superfici e aree idonee per l’installazione di impianti a fonti rinnovabili e verificata la compatibilità con:

- i beni culturali con dichiarazioni di notevole interesse pubblico ai sensi del titolo II del D.lgs 42/2004 (*VINCOLI IN RETE* <http://vincoliinrete.beniculturali.it/vir/vir/vir.html> ed elenco beni architettonici della Provincia di Agrigento);
- i beni paesaggistici ai sensi del D.lgs 42/2004 art. 10, art. 136 e art. 134, lett. c, estrapolati dal SITR regionale (Piano paesaggistico di Agrigento);
- il portale dei beni culturali (SITAP) e il portale della Paesaggistica (<https://paesaggistica.sicilia.it/>)

**Si evidenzia che l’impianto eolico Saladino non rientra nella fascia di rispetto dei 3 km dei beni sottoposti a tutela ai sensi del decreto legislativo 22 gennaio 2004, n. 42, né ricadono nella fascia di rispetto dei beni sottoposti a tutela ai sensi della parte seconda oppure dell’articolo 136. Pertanto l’impianto si colloca in area idonea. Si fa riferimento all’elaborato cartografico cod. SIA.14.A “Carta delle aree non idonee ai sensi dell’art.20 comma 8 del D.lgs. 199/2021 e smi”.**

La connessione alla RTN è basata sulla soluzione tecnica minima generale per la connessione STMG, con codice pratica **202400719**, ricevuta per l’impianto in oggetto da Terna - Rete Elettrica Nazionale S.p.A.

La presente relazione costituisce lo studio della gittata massima raggiungibile dalla rottura di una pala o di un frammento di essa da un aerogeneratore del tipo VESTAS V-162, da installare nel parco eolico in oggetto. Nel calcolo si è considerato l'ipotesi più gravosa, cioè di distacco dalla radice della pala (nel punto di serraggio sul mozzo), punto di maggiore sollecitazione, per evidente effetto di intaglio dovuto al collegamento. Questa valutazione viene eseguita al fine di prevedere possibili problemi che una simile eventualità, per quanto improbabile, possa procurare a cose o persone.



## 1.1. Dati Generali di Progetto

Nella tabella seguente sono riepilogate in forma sintetica le principali caratteristiche tecniche dell'impianto in progetto.

Tabella 1. Tabella sinottica dati di progetto

ESE SALADINO SRL	
<b>Luogo di installazione:</b>	Parco Eolico: Contrada Saladino Località: Comuni di Naro (AG), Camastra (AG) e Licata (AG)
<b>Denominazione impianto:</b>	Parco eolico: Saladino
<b>Dati area di progetto:</b>	Parco eolico: Comuni di Naro (AG), Camastra (AG) e Licata (AG)
<b>Potenze impianto (kW):</b>	Parco eolico: 64.800 kW Immissione BESS: 41.600 kW Prelievo BESS + AUSILIARI: 44.100 kW
<b>Dati generali sistema di accumulo BESS</b>	Potenza massima in immissione in rete: 41.600 kW Potenza massima in prelievo dalla rete (AC): 41.600 kW Capacità energetica: 184,32 MWh
<b>Informazioni generali del sito:</b>	Zona prevalentemente rurale a basso tasso di inurbamento.
<b>Tipologia aerogeneratore</b>	Impianto Eolico: Aerogeneratore tripala con regolazione attiva del passo pala e dell'orientamento del rotore avente diametro di 162 m con mozzo a 125 m di altezza
<b>Connessione:</b>	Connessione ad uno stallo a 36 kV di una stazione TERNA
<b>Caratterizz. -urbanistico/vincolistica:</b>	Piano Regolatore di Naro (AG), Camastra (AG) e Licata (AG)

## 2. INQUADRAMENTO TERRITORIALE

Gli aerogeneratori (in numero di nove) dell'impianto sono denominati con le sigle T1, T2, T3, T4, T5, T6, T7, T8 e T9. Nel dettaglio si ricordi che:

- il Comune di Naro (AG) è interessato da n. 4 aerogeneratori, identificati dalle sigle T1, T2, T5, T6 e da alcuni tratti del cavidotto MT di connessione alla RTN;
- il Comune di Camastra (AG) è interessato da n. 4 aerogeneratori, identificati dalle sigle T3, T7, T8, T9 e da alcuni tratti del cavidotto MT di connessione alla RTN;
- il Comune di Licata (AG) è interessato da n. 1 aerogeneratori, identificati dalle sigle T4, dalla Sottostazione Utente, SSEU, dalla Stazione Elettrica, SE, Terna e da alcuni tratti del cavidotto MT di connessione alla RTN;

L'impianto sarà collocato in agro del Comune di Naro, Camastra e di Licata, in provincia di Agrigento, all'interno delle seguenti cartografie e fogli di mappa catastali:

- Fogli IGM in scala 1:25.000 di cui alle seguenti codifiche: 271-I-NO-Naro, 271-I-SO-Palma di Montechiaro e 271-I-SE-Favarotta
- CTR in scala 1:10.000, di cui alle seguenti codifiche: 637100, 637110, 637140, 637150, 642020, 642030.
- Fogli di mappa nn. 122, 123 e 199 del comune di Naro, fogli di mappa nn. 6, 11, 12 del Comune di Camastra (AG) e fogli di mappa nn. 1, 13 e 14 del Comune di Licata (AG).

Tabella 2. Coordinate aerogeneratori

	Inquadramento geografico					
	Coordinate Torri Eoliche (SR WGS84 DMS)		Coordinate Torri Eoliche (SR ETRS89 / UTM33)		Alt.	Comune
T1	37.230109°	13.790509°	392707.24 m E	4121084.79 m N	257 m	Naro (AG)
T2	37.237748°	13.794286°	393053.12 m E	4121928.04 m N	292 m	Naro (AG)
T3	37.234591°	13.807561°	394226.27 m E	4121562.91 m N	255 m	Camastra (AG)
T4	37.227518°	13.835500°	396694.94 m E	4120747.34 m N	277 m	Licata (AG)
T5	37.233278°	13.821033°	395419.48 m E	4121402.28 m N	228 m	Naro (AG)
T6	37.239462°	13.824312°	395718.88 m E	4122084.71 m N	247 m	Naro (AG)
T7	37.238807°	13.815092°	394900.17 m E	4122022.25 m N	240 m	Camastra (AG)
T8	37.247358°	13.814466°	394856.50 m E	4122971.61 m N	249 m	Camastra (AG)
T9	37.259226°	13.808639°	394356.22 m E	4124294.74 m N	296 m	Camastra (AG)

Tabella 3. Coordinate baricentriche SSEU

	Inquadramento geografico					
	Coordinate SSEU (SR WGS84 DMS)		Coordinate SSEU (SR ETRS89 / UTM33)		Alt.	Comune
SSEU	37.182498°	13.866641°	399397.91 m E	4115719.16 m N	359 m	Licata (AG)

Tabella 4. Particelle catastali aerogeneratori

Inquadramento catastale					
	Foglio	Particella	Coltura	Destinazione Progetto	Comune
T1	123	48 - 49	SEMINATIVO - MANDORLETO	Piazza torre eolica	Naro (AG)
T2	122	153	ULIVETO	Piazza torre eolica	Naro (AG)
T3	12	170 - 171 - 177	SEMINATIVO	Piazza torre eolica	Camastra (AG)
T4	1	71	SEMINATIVO	Piazza torre eolica	Licata (AG)
T5	199	143	SEMINATIVO - ULIVETO	Piazza torre eolica	Naro (AG)
T6	199	70 - 71 - 72	SEMINATIVO - ULIVETO	Piazza torre eolica e servitù	Naro (AG)
T7	12	50 - 75 - 76	SEMINATIVO - PASCOLO	Piazza torre eolica e servitù	Camastra (AG)
T8	11	285	SEMINATIVO	Piazza torre eolica	Camastra (AG)
T9	6	130 - 526 - 415 - 509 - 416 - 471 - 510	SEMINATIVO - MANDORLETO	Piazza torre eolica e servitù	Camastra (AG)

Tabella 5. Particelle catastali SSEU

Inquadramento catastale					
	Foglio	Particella	Coltura	Destinazione Progetto	Comune
SSEU	13	142 - 169 - 33 - 180	SEMINATIVO - MANDORLETO - ULIVETO - VIGNETO	Area SSEU	Licata (AG)

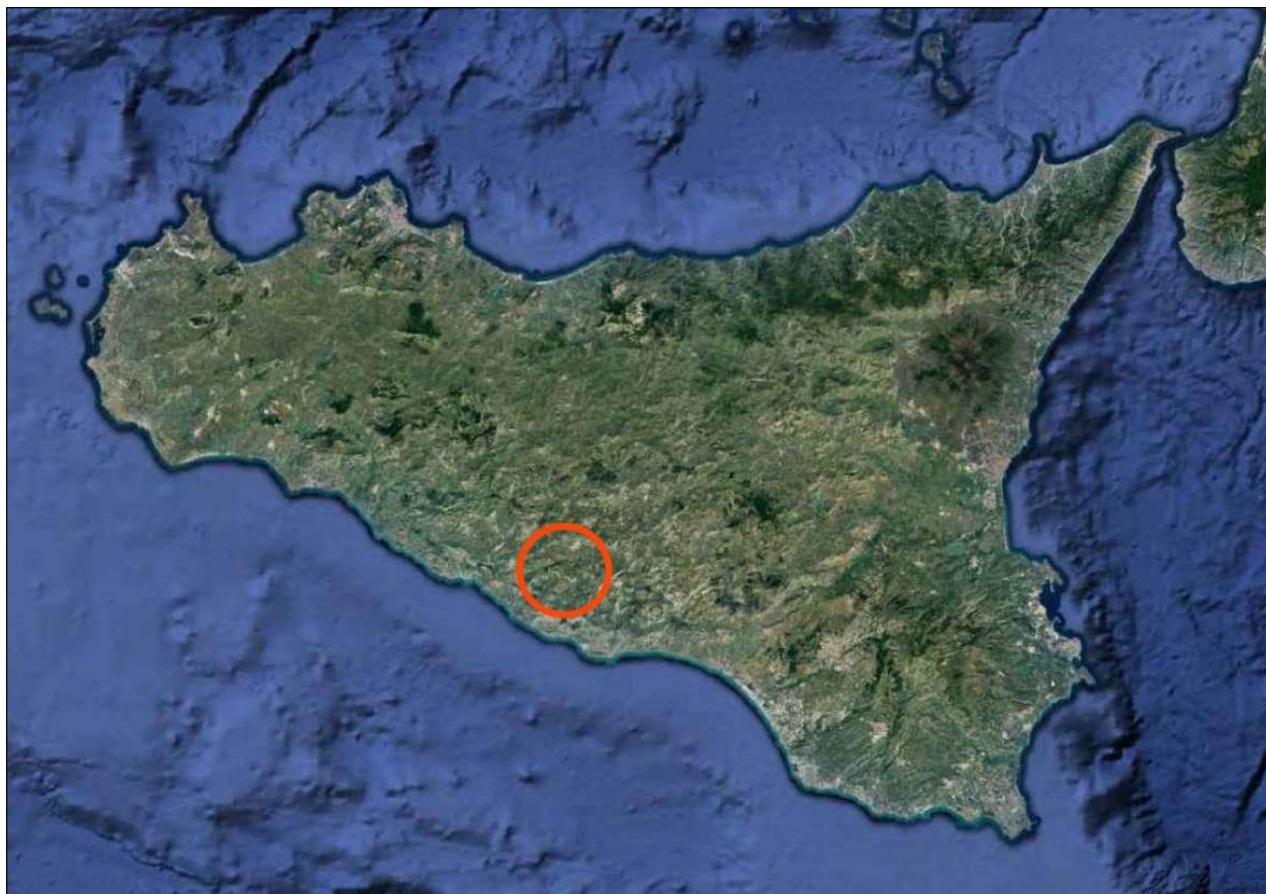


Figura 1. Ubicazione dell'impianto da foto satellitare

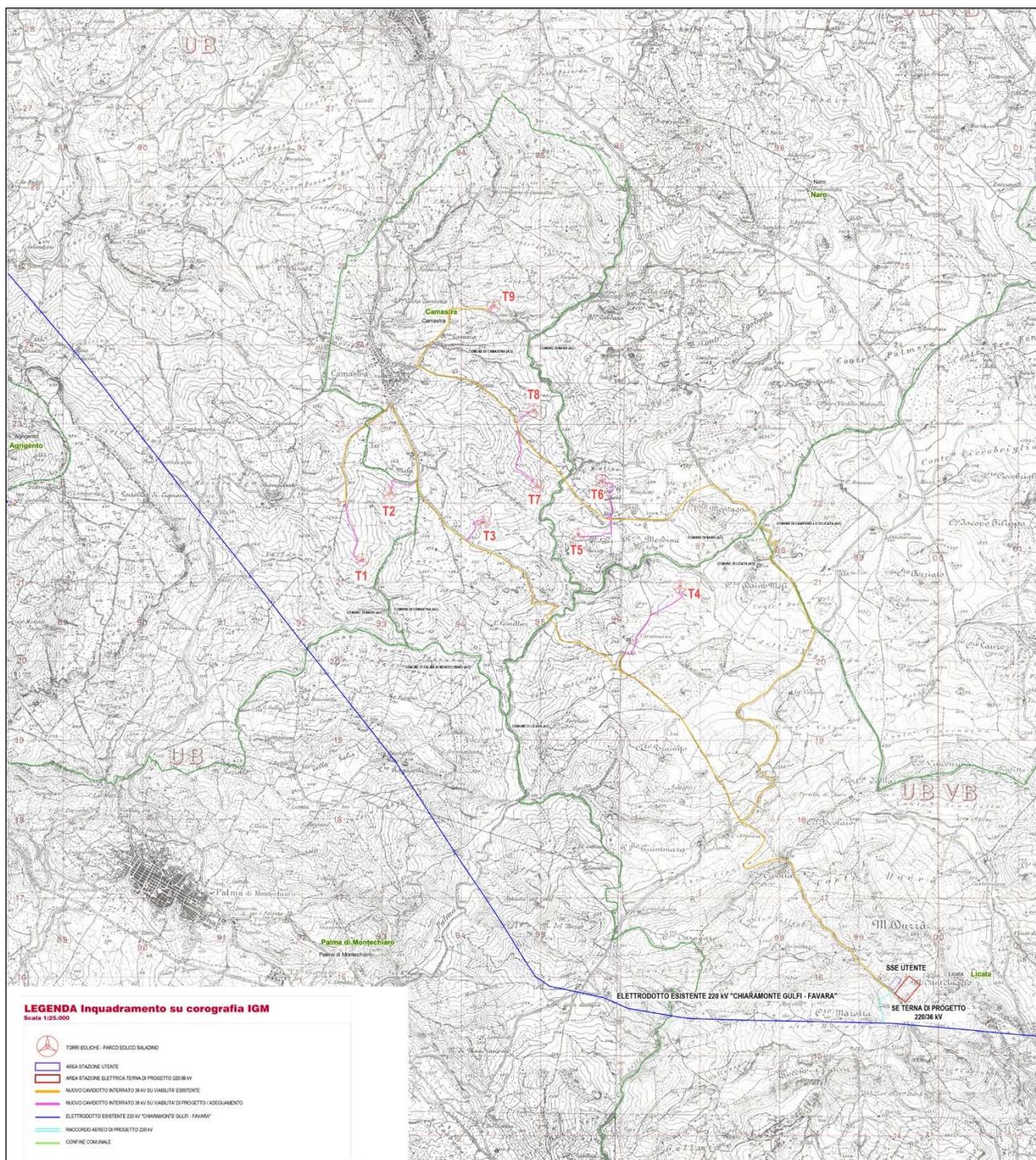


Figura 2. Ubicazione dell'impianto da cartografia IGM

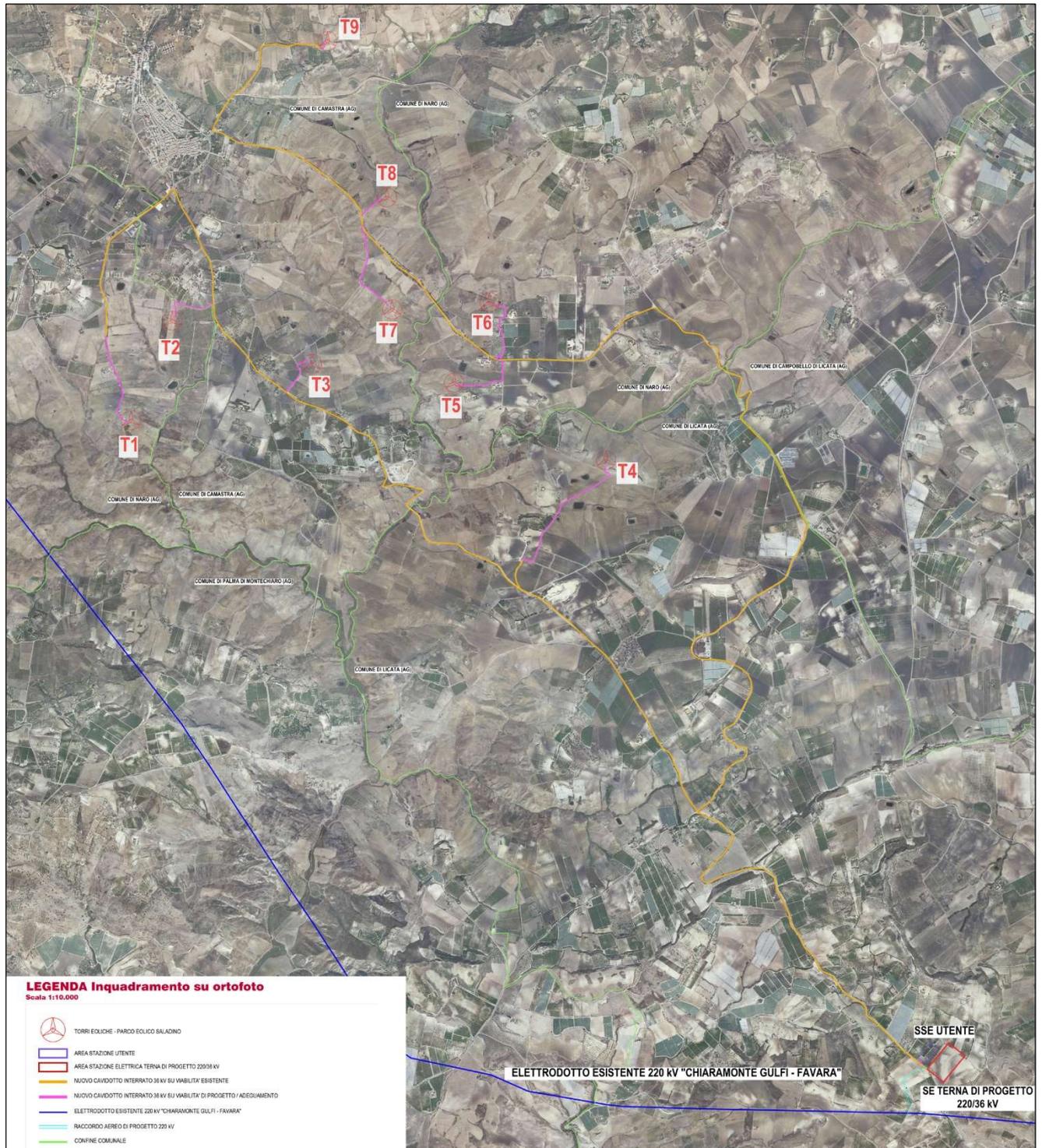


Figura 3. Inquadramento delle opere in progetto su Ortofoto

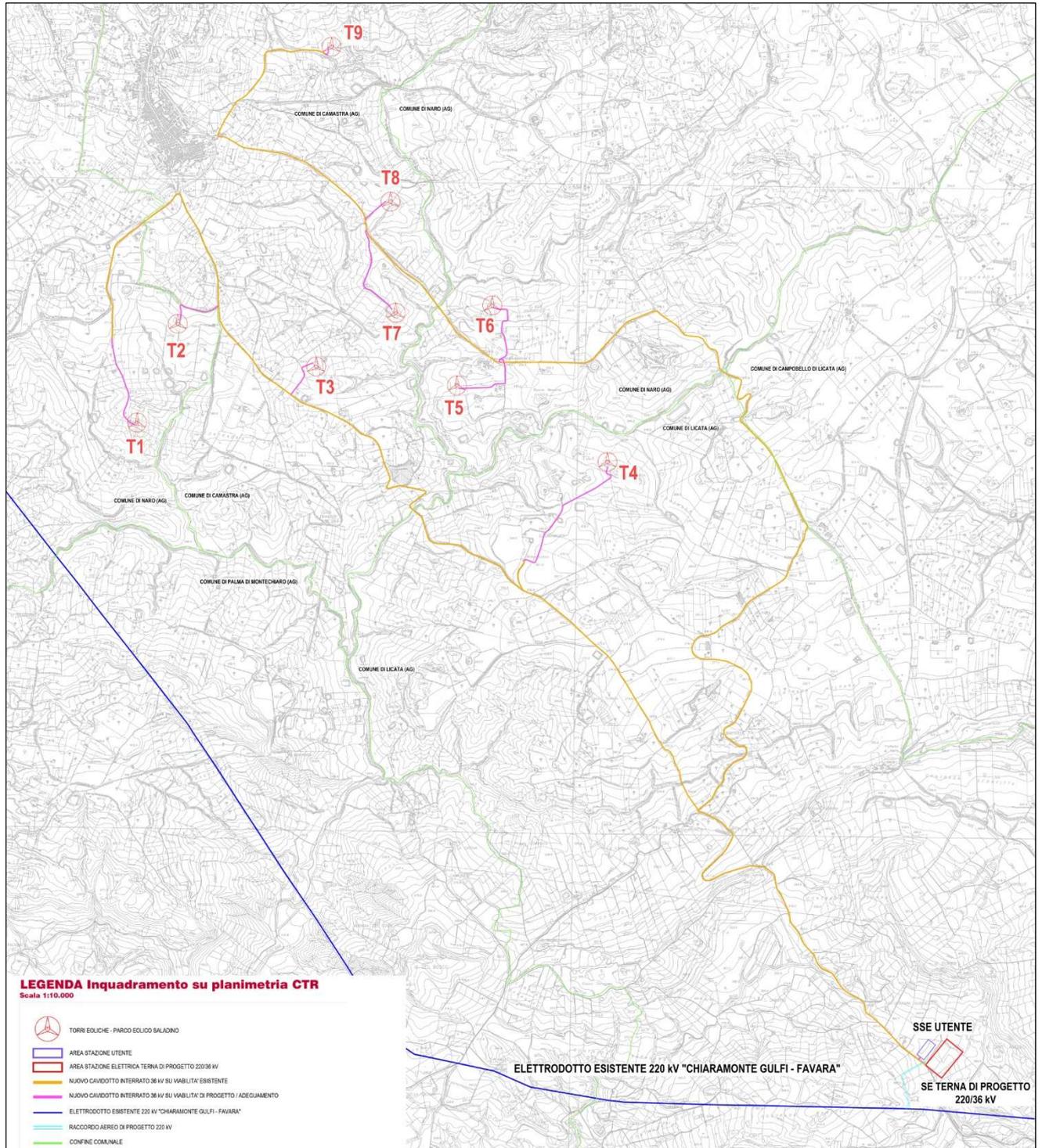


Figura 4. Inquadramento delle opere in progetto su CTR

### 3. DESCRIZIONE SINTETICA AEROGENERATORI

Il parco eolico denominato Saladino è composto da 9 aerogeneratori topograficamente, strutturalmente ed elettricamente indipendenti dagli altri, opportunamente disposti e collegati in relazione alla disposizione dell'impianto. Le postazioni degli aerogeneratori sono costituite da piazzole collegate da una viabilità d'impianto e sono collegati fra loro e alla sottostazione tramite un cavidotto interrato.

L'aerogeneratore è una macchina che sfrutta l'energia cinetica del vento per la produzione di energia elettrica, la cui struttura è rappresentata nell'elaborato grafico "Carta del tipico aerogeneratore" dove di seguito si riporta un estratto:



Figura 5 Schema tipo aerogeneratore avente altezza al mozzo pari a 125 m. e diametro rotore di 162 m per un'altezza complessiva di 206 m

Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto è un aerogeneratore ad asse orizzontale con rotore tripala modello **VESTAS V162 potenza massima installata di 7,2 MW**, le cui caratteristiche principali sono:

- **plinto di fondazione** realizzato in conglomerato cementizio armato;
- **torre di sostegno tubolare troncoconica**, realizzato in lastre di acciaio laminato, avente altezza fino all'asse del rotore pari a 125,00 m;
- **un corpo centrale (navicella)**, realizzata in carpenteria metallica e rivestimento in fibra di vetro e resina epossidica, in cui sono collocati il generatore elettrico, i dispositivi di controllo e le apparecchiature idrauliche;
- **rotore tripala a passo variabile**, realizzato in fibra di vetro e resina epossidica, di diametro 162,00 m e collegato alla navicella tramite mozzo rigido in acciaio.
- **velocità di rotazione** 4.3 – 12.1 giri/min.

**L'altezza massima al colmo dell'aerogeneratore sarà quindi di 206 m** (125 m fino all'asse del rotore + 81 m di raggio del rotore). Tra le diverse componenti tecniche della turbina, sono presenti:

- Un sistema di segnalazione notturna, che consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore (in accordo con le disposizioni dell'ENAC)
- Un sistema di segnalazione diurna che consiste nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande bianche e rosse di 6 m l'una per larghezza, in modo da impegnare gli ultimi 18 m delle pale stesse
- Un sistema antincendio nella navicella, che consiste in rilevatori di fumo e CO e sistemi di spegnimento ad acqua atomizzata ad alta pressione nel caso di incendi dei componenti meccanici e a gas inerte (azoto) nel caso di incendi dei componenti elettrici.
- Un sistema antifulmine, in grado di catturare il fulmine per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, e incanalarla fino al sistema di messa a terra.
- Un sistema di controllo che, a velocità del vento superiori a quella per cui la turbina raggiunge la sua potenza nominale (10-14 m/s, mentre entra in funzione alla velocità di 3 m/s), inizia a funzionare in maniera da limitare la potenza della macchina e da prevenire sovraccarichi, fino a bloccare la macchina attraverso il sistema frenante in caso di venti estremi.

#### 4. LEGGI DEL MOTO PER DETERMINARE LA GITTATA MASSIMA

Non considerando le variabili di carattere aerodinamiche proprie della pala, la gittata massima della pala o della sezione di pala distaccata, si verifica nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare con un angolo compreso tra i 55-80 gradi e di descrivendo un moto a “proiettile” del corpo distaccato. In condizioni reali, la pala ha una complessità aerodinamica tale che, la descrizione di un moto a proiettile 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.

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

$$M \times g = M a_g$$

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

Considerando di applicare tutto il peso nel centro di massa della pala, il momento della forza peso è nullo, (avendo scelto il baricentro come polo per il calcolo dei momenti). Pertanto la seconda equazione ci restituisce che il corpo durante la traiettoria che percorre, si mette a girare indisturbato intorno al suo asse principale di inerzia. La soluzione al problema ci viene allora dalla risoluzione della prima equazione. 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, 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.

Per determinare la gittata di un corpo che si muove con moto parabolico (cioè sotto l'azione della sola forza peso e trascurando l'attrito con l'aria) si è utilizzato un sistema di riferimento cartesiano  $xy$  in cui l'origine  $O$  degli assi del sistema, coincida con il punto da cui il corpo è stato lanciato, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile le forze di attrito dell'aria e quelle del vento.

Le equazioni del moto di un punto materiale soggetto solo alla forza di gravità sono:

$$\frac{d^2x}{dt^2} = 0$$

$$\frac{d^2y}{dt^2} = -g$$

con  $g=9,81 \text{ m/s}^2$ .

Di seguito si riporta una rappresentazione grafica della legge di moto di caduta di un corpo, con velocità iniziale  $v_0$  e con una inclinazione rispetto all'orizzontale di  $\vartheta$

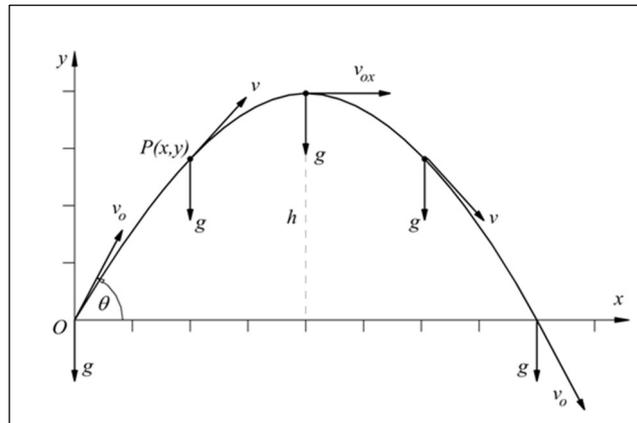


Figura 6 Traiettoria di un corpo in caduta (fonte immagine [www.edutecnica.it](http://www.edutecnica.it))

La legge del moto soluzione delle equazioni riportate in precedenza è:

$$x(t) = x_0 + v_x \cdot t$$

$$y(t) = y_0 + v_y \cdot t - \frac{1}{2} g \cdot t^2$$

con:

- $x_0$  e  $y_0$  posizione iniziale del corpo;
- $v_x$  e  $v_y$  componenti della velocità del corpo.

La traiettoria del corpo intercetta il suolo al tempo T tale che  $y(T) = 0$ . Dalla legge del moto si ottiene:

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g} \cdot \sqrt{v_y^2 + (2g \cdot y_0)}$$

Determinato così il tempo di volo del corpo, la gittata massima  $G_{max}$  si ricaverà dalla seguente legge:

$$G_{max} = x(T).$$

## 5. MODALITA' DI ROTTURA DELLA PALA

Le modalità di rottura della pala possono essere assai diverse. Essendo un organo in rotazione è soggetto alla forza centripeta che va equilibrata con l'azione della struttura della torre stessa. Per minimizzare tale forza, la pala è costruita in materiale leggero; normalmente si utilizzano materiali compositi che sfruttano le caratteristiche meccaniche così da far fronte ai carichi aerodinamici imposti. Le modalità di rottura sono classificabili in due gruppi:

- 1) Rottura della pala alla radice.
- 2) Rottura di frammento.

### 5.1. Rottura della pala alla radice

Questo tipo di rottura, 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.

Come riportato da report sulle ragioni dei distacchi delle pale alla radice, effettuati dalla casa costruttrice di aerogeneratori "VESTAS", le principali cause sono da ricercarsi in:

- 1) *"la rottura della giunzione bullonata fra la pala ed il mozzo. Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni serrati opportunamente durante l'installazione della turbina. Il precarico conferito ai bulloni durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei bulloni 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'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni ed al distacco della pala".*
- 2) *"la discontinuità della struttura che passa da un carico distribuito sulle fibre alla flangia di attacco crea inevitabili concentrazioni tensionali che con l'andare del tempo può creare problemi di affaticamento con conseguente rottura".*

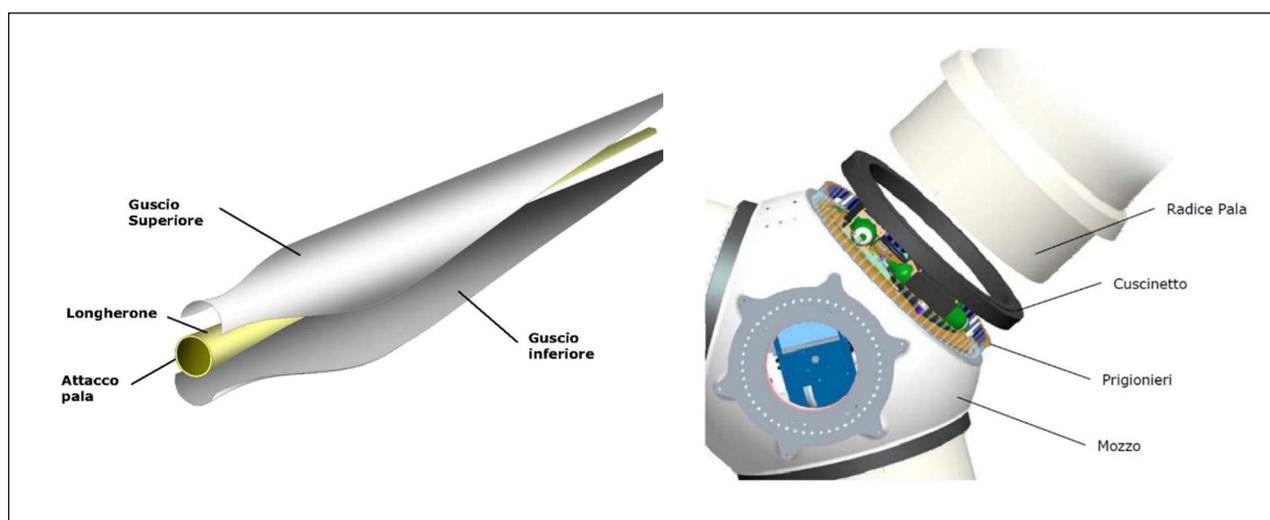


Figura 7 Particolare della pala e dettaglio dell'ancoraggio mozzo – pala. (VESTAS Italia srl)

## 5.2. Calcolo della Gittata Massima in caso di rottura alla radice

Per la stima della gittata massima dell'intera pala si impongono alcune ipotesi semplificative:

- distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
- vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- assenza di attriti viscosi durante il volo: questa ipotesi risulta conservativa considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20%;

Lo schema considerato per il calcolo della gittata è di seguito riportato e rappresentato graficamente, avendo indicato con G il baricentro:

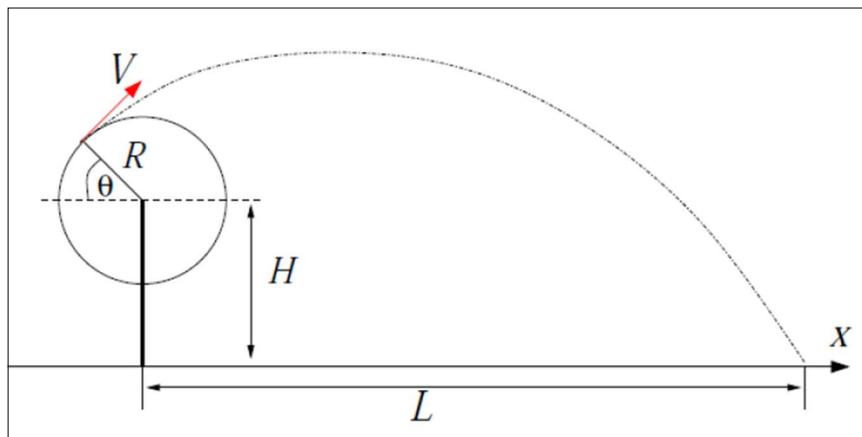


Figura 8 Schema adottato per il calcolo della gittata (Vestas Italia Srl)

Esplicitando la legge del moto per ottenere la gittata massima  $G_{max} = x(T)$ , rispetto alle coordinate e alle componenti di velocità iniziali della pala (baricentro della pala  $R_G$ ) al momento del distacco dal mozzo, pari a:

$$x_0 = -R \cdot \cos \vartheta$$

$$y_0 = H + R \cdot \sin \vartheta$$

$$v_x = V \cdot \sin \vartheta$$

$$v_y = V \cdot \cos \vartheta$$

Sostituendo l'espressione del tempo di volo precedentemente riportata sopra, otteniamo la gittata massima G in termini di  $V_G$  e di  $\vartheta$ :

$$G_{max} = \frac{V \sin \vartheta}{g} \cdot \left[ \sqrt{V^2 \cos^2 \vartheta + 2g(H + R \sin \vartheta)} \right] - R \cos \vartheta$$

La prima di per effettuare il calcolo della gittata massima, si ricaveremmo i valori relativi alle coordinate de baricentro della pala e alla componente di velocità periferica della stessa e dell'altezza di lancio.

### **Posizione del baricentro della pala $R_G$**

La posizione del baricentro della pala, come precedentemente riportato, di troverà ad 1/3 del raggio della pala; in considerazione che il raggio della pala è di 81 m:

$$R_G = 81/3 = 27 \text{ m.}$$



### **Velocità periferica $V_G$**

La velocità angolare media  $\omega$  è l'angolo descritto dal corpo in movimento nell'unità di tempo. Indicando con  $n$  la velocità di rotazione 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  $2\pi$  radianti, per  $n$  giri avremo  $2\pi n$  radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare  $\omega$  al minuto del corpo in movimento.

In considerazione che il numero di giri è pari a  **$n = 12,1$  giri/min**, numero di giri massimo valutato per l'aerogeneratore di progetto, considerato alle massime velocità del vento che si possono raggiungere, la velocità angolare risulta:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} = 1,27 \text{ [rad/min]}$$

Nel moto circolare uniforme, la velocità periferica è direttamente proporzionale al raggio. Ad ogni giro baricentro di raggio  $R_G$  percorre la circonferenza  $2\pi R$ , dunque la velocità periferica in metri al secondo di un corpo rotante sarà pari a:

$$V_G = \omega \cdot R_G = 34,29 \text{ [m/s]}$$

Tenendo conto delle forze di resistenza, il valore della velocità del baricentro risulta ridotta del 20% rispetto all'assenza di resistenze, per cui il valore reale è 27,43 m/s.

### **Calcolo dell'altezza di lancio $H_G$**

In considerazione della geometria della torre adottata nel progetto, avete un'altezza pari a  $H = 125$  m, l'altezza di lancio ( $H_G$ ) sarà uguale all'altezza dell'intera torre più il valore della proiezione di  $R_G$  sulla verticale ossia:

$$H_G = H + R_G \cdot \sin \vartheta.$$

### **Calcolo della gittata $G_{max}$ :**

g	n	$\omega$ [rad/s]	D [m]	R [m]	rg [m]	$V_G$ [m/s]	$H_{tot}$ [m]	$\vartheta$ [°]	$\vartheta$ [rad]	$v_{x0}$	$v_{y0}$	$x_g$ [m]	$y_g$ [m]	$L_g$ [m]
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	0,00	0,00	0,00	27,36	27,00	0,00	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	5,00	0,09	2,38	27,25	26,90	2,35	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	10,00	0,17	4,75	26,94	26,59	4,69	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	15,00	0,26	7,08	26,42	26,08	6,98	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	20,00	0,35	9,35	25,71	25,37	9,23	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	25,00	0,44	11,56	24,80	24,47	11,41	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	30,00	0,52	13,67	23,69	23,39	13,49	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	35,00	0,61	15,68	22,41	22,12	15,48	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	40,00	0,70	17,58	20,96	20,69	17,35	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	45,00	0,79	19,34	19,35	19,10	19,08	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	50,00	0,87	20,95	17,59	17,36	20,68	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	55,00	0,96	22,40	15,70	15,50	22,11	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	60,00	1,05	23,68	13,69	13,51	23,38	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	65,00	1,13	24,79	11,58	11,42	24,46	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	70,00	1,22	25,70	9,37	9,25	25,37	54,00
<b>9,81</b>	<b>12,10</b>	<b>1,27</b>	<b>162,00</b>	<b>81,00</b>	<b>27,00</b>	<b>27,36</b>	<b>125,00</b>	<b>75,00</b>	<b>1,31</b>	<b>26,42</b>	<b>7,10</b>	<b>7,01</b>	<b>26,08</b>	<b>54,00</b>
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	80,00	1,40	26,94	4,77	4,71	26,59	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	85,00	1,48	27,25	2,40	2,37	26,90	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	90,00	1,57	27,36	0,02	0,02	27,00	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	95,00	1,66	27,25	-2,36	-2,33	26,90	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	100,00	1,74	26,94	-4,73	-4,66	26,59	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	105,00	1,83	26,43	-7,06	-6,96	26,09	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	110,00	1,92	25,72	-9,33	-9,21	25,38	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	115,00	2,01	24,80	-11,54	-11,39	24,48	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	120,00	2,09	23,71	-13,65	-13,48	23,40	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	125,00	2,18	22,43	-15,67	-15,46	22,13	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	130,00	2,27	20,98	-17,56	-17,33	20,70	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	135,00	2,36	19,37	-19,32	-19,07	19,11	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	140,00	2,44	17,61	-20,93	-20,66	17,38	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	145,00	2,53	15,72	-22,39	-22,10	15,51	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	150,00	2,62	13,71	-23,67	-23,36	13,53	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	155,00	2,70	11,60	-24,78	-24,45	11,44	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	160,00	2,79	9,39	-25,69	-25,36	9,27	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	165,00	2,88	7,12	-26,41	-26,07	7,03	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	170,00	2,97	4,79	-26,93	-26,58	4,73	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	175,00	3,05	2,43	-27,25	-26,89	2,39	54,00
9,81	12,10	1,27	162,00	81,00	27,00	27,36	125,00	180,00	3,14	0,04	-27,36	-27,00	0,04	54,00

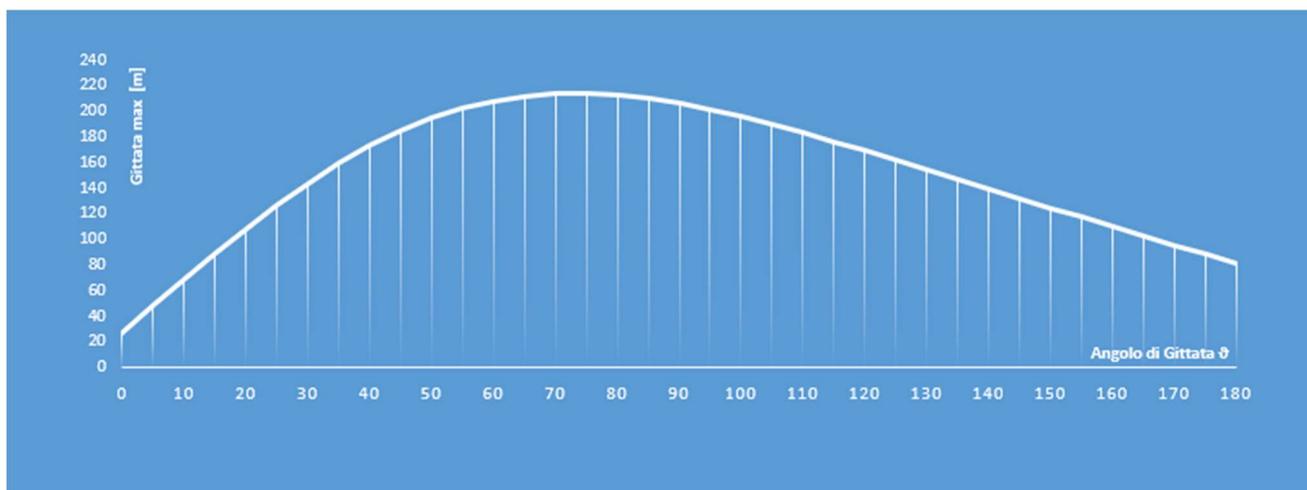


Figura 9 Andamento della Gittata totale in funzione dell'angolo di distacco della pala "θ"

Dai calcoli riportati sopra si rileva che la gittata massima di ha per un angolo  $\theta$  pari a **75°**

Al valore  $G_{max}$  ottenuto andrà infine sommata un'aliquota pari ai 2/3 della pala, ipotizzando in tale posizione il baricentro della stessa pari a 54 m.

Quindi in conclusione si può evincere che a causa della rottura della pala alla radice la **distanza massima** dalla torre, che può raggiungere la pala stessa, è pari a **213,97 m**.

### 5.3. Rottura di frammento

Dagli studi condotti dai costruttori di aerogeneratori, che nel caso in oggetto, si ricorda sono prodotte dalla ditta VESTAS, riportano che, questo tipo di incidente si è quasi sempre manifestato in concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica. Di seguito si riportano gli accorgimenti adoperati dalla ditta costruttrice.

*"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 ceramico 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".*

In riferimento allo studio condotto "Recommendations of Risk assessment of ice throw and Blade Failure in Ontario – Canadian Wind Energy Association – M.P. Leblanc – Garrad Hassan", in merito alla determinazione delle probabilità di accadimento e sulle distanze raggiunte dai frammenti, hanno dimostrato che, i frammenti staccatosi dalla turbina vadano oltre i 50 m dalla torre è dell'ordine di  $2 \times 10^{-5}$ .

Facendo riferimento al rischio accertato in sede progettuale, che secondo l'European Wind Turbine Standards II, si può assumere pari a  $10^{-6}$ , si può considerare un valore di gittata massima, che il frammento può raggiungere, pari a circa 190 --220 m. Superate

tali distanze la probabilità diminuisce ancora di un fattore 10 e, per eventi rari come quelli della rottura di una pala la probabilità diventa praticamente nulla.

## **6. CALCOLO DELLA DISTANZA DI SICUREZZA DEGLI AEROGENERATORI DA STRUTTURE E INFRASTRUTTURE DOVUTO AL CROLLO DELLA TORRE.**

In questo paragrafo verrà trattata l'eventualità del crollo della torre a causa di cedimenti strutturali della torre stessa o delle opere di fondazione.

È evidente che il vento, sempre che sia stato soltanto questa la condizione eccezionale di carico, abbia trovato una debole attività contrastante, cioè anti-ribaltante, nel blocco di fondazione.

Questo è rimasto compatto ed unito, come almeno avrebbe dovuto per rispondere al carico eolico. L'azione risultante del vento si manifesta e può essere ridotta ad una forza lungo l'asse del rotore.

Ne consegue un rilevante momento flettente (forza proporzionale all'altezza della turbina) che si esercita necessariamente sul basamento. Il risultato evidente è che il corpo di fondazione non sia riuscito ad offrire una massa adeguata e sufficiente per opporsi al momento d'origine eolica, quando il vento raggiunga il valore eccezionale sviluppatosi, causando il crollo della stessa.

Nel caso dell'impianto eolico in oggetto, verranno considerate delle distanze di sicurezza adeguate, in modo da mettere in sicurezza i possibili obbiettivi coinvolti dal crollo della torre. Si rappresenta che, da dati riportati in letteratura, la probabilità di crollo della torre per cedimento della fondazione è molto basso. Di seguito si riportano le considerazioni attuate per l'impianto in oggetto.

Gli aerogeneratori impiegati per il parco eolico in esame, presentano le seguenti caratteristiche, già descritte nel paragrafo 3 e di seguito nuovamente riportate:

- **plinto di fondazione** realizzato in conglomerato cementizio armato;
- **torre di sostegno tubolare troncoconica**, realizzato in lastre di acciaio laminato, avente altezza fino all'asse del rotore pari a 125,00 m;
- **un corpo centrale (navicella)**, realizzata in carpenteria metallica e rivestimento in fibra di vetro e resina epossidica, in cui sono collocati il generatore elettrico, i dispositivi di controllo e le apparecchiature idrauliche;
- **rotore tripala a passo variabile**, realizzato in fibra di vetro e resina epossidica, di diametro 162,00 m e collegato alla navicella tramite mozzo rigido in acciaio.
- **velocità di rotazione** variabile da 4,3 a 12,1 giri/min.

Come parametro di distanza di sicurezza dai possibili obbiettivi che potrebbero essere coinvolti (opere strutturali e infrastrutturali) si fa riferimento al DPR 495/92 che all'art.66 norma sulla distanza delle torri dalle strade, che riporta " l'aerogeneratore deve essere installato inderogabilmente ad una distanza minima dal confine stradale non inferiore all'altezza della torre di sostegno più la lunghezza della pala dell'aerogeneratore e più un franco non inferiore al 25% della misura ottenuta, e comunque ad una distanza superiore a quella derivante dalla gittata massima degli elementi rotanti"

Quindi ai sensi della norma, si è scelto di considerare un franco pari al 25% della somma dell'altezza della torre con la lunghezza della pala (altezza al top)

Altezza al top= altezza torre + lunghezza pala= 125+81= 206 m

Distanza di sicurezza  $D_s$

$D_s$ =Altezza al top \*25%= **251,5 m**

Si ricorda che il valore di gittata massima degli elementi rotanti, calcolata nel paragrafo precedente è pari a **213,9 m**, minore della distanza di sicurezza appena calcolato.

**Nel progetto del parco eolico di Saladino, come distanza di sicurezza degli aerogeneratori dalle strade provinciali e statali, e dalle opere strutturali limitrofi (magazzini agricoli, bagli, casali, ecc..) verrà considerato un valore cautelativo di sicurezza, pari a 250 m.**