



REGIONE
SICILIA



PROVINCIA
DI TRAPANI



COMUNE
DI MARSALA



COMUNE
DI SALEMI



COMUNE
DI MAZARA DEL VALLO

OGGETTO:

**Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW
denominato "CE PARTANNA II"
situato nei comuni di Marsala, Salemi e Mazara del Vallo
provincia di Trapani (TP)**

ELABORATO:

**CALCOLO MASSIMA GITTATA
DEGLI ELEMENTI ROTANTI**



PROPONENTE:



P.I. 16805241003
Via Vincenzo Bellini,
22 00198 Roma

C.F. e n. iscriz. REG. IMPR.: 16805241003
REA: RM_1676856
PEC: aewind.quarta@legalmail.it

PROGETTAZIONE:

Ing. Carmen Martone
Iscr. n.1872
Ordine Ingegneri Potenza
C.F. MRTCMN73D56H703E



Geol. Raffaele Nardone
Iscr. n. 243
Ordine Geologi Basilicata
C.F. NRDRFL71H04A509H

EGM PROJECT S.R.L.
VIA VERRASTRO 15/A
85100- POTENZA (PZ)
P.IVA 02094310766
REA PZ-206983

Livello prog.	Cat. opera	N°. prog.elaborato	Tipo elaborato	N° foglio/Tot. fogli	Nome file	Scala
PD	I.IE	9	R		RS06REL0009A0.PDF	
REV.	DATA	DESCRIZIONE			ESEGUITO	VERIFICATO
00	APRILE 2023	Emissione				Ing. Carmen Martone EGM Project
						Ing. Carmen Martone EGM Project

PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 1 di 20
---	---	--

Sommario

1. PREMESSA	3
1.1 Scopo del documento.....	3
2. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO.....	3
2.1 Iniziativa	8
2.2 Attenzione per l’ambiente	8
3. TIPOLOGIE DI INCIDENTI	8
4. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI	9
5. FORZE AGENTI SULLA TRAIETTORIA.....	10
6. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE E CALCOLO GITTATA IN WORST CASE...11	
6.1 Geometria del problema e calcolo della gittata (1° caso).....	15
6.2 Calcolo della gittata massima	16
7. CONCLUSIONI.....	20

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 2 di 20
--	---	--

Figura 1 - Inquadramento area parco eolico su base ortofoto.....	4
Figura 2 - Inquadramento area parco eolico su catastale.....	5
Figura 3 - Inquadramento area campo e sottostazione su CTR	6
Figura 4 - Inquadramento area campo e sottostazione su IGM	7
Figura 5 - Composizione di una pala	11
Figura 6 - Disposizione della navicella	12
Figura 7 - Dimensioni e pesi della gondola	13
Figura 8 - Disegno della lama	14
Figura 9 - Schema grafico di gittata.....	16
Tabella 1 – Fogli e particelle aerogeneratori.....	7
Tabella 2 – Caratteristiche principali dell’aerogeneratore previsto nel parco eolico CE PARTANNA II.	10
Tabella 3 - Gittata con velocità di distacco 32,56 m/s	17
Tabella 4 - Valori della gittata con evidenziata quella massima.....	19

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 3 di 20
---	---	--

1. PREMESSA

1.1 Scopo del documento

Con il Decreto Legislativo 29 dicembre 2003, n. 387, il Parlamento Italiano ha proceduto all’attuazione della direttiva 2001/77/CE relativa alla promozione dell’energia elettrica prodotta da fonti energetiche rinnovabili nel mercato interno dell’elettricità.

Con la nuova normativa introdotta dal d.lgs. 30 giugno 2016, n. 127 (legge Madia), la conferenza dei servizi si potrà svolgere in modalità “Sincrona” o “Asincrona”, nei casi previsti dalla legge.

La Regione Siciliana con il D.P. Reg. Siciliana 48/2012, recependo il decreto ministeriale 10 settembre 2010, ha stabilito le procedure amministrative di semplificazione per l’autorizzazione degli impianti da fonti rinnovabili. In particolare per impianti fotovoltaici superiori ad 1 MW di potenza è prevista l’indizione della conferenza dei servizi ai sensi del D.Lgs. 387/2003.

Il citato decreto stabilisce la documentazione amministrativa necessaria e la disciplina del procedimento unico.

Il Progetto, nello specifico, è compreso tra le tipologie di intervento riportate nell’Allegato IV alla Parte II, comma 2 del D.Lgs. n. 152 del 3/4/2006 (cfr. 2c) – “Impianti industriali non termici per la produzione di energia, vapore ed acqua calda con potenza complessiva superiore a 1MW”, pertanto rientra tra le categorie di opere da sottoporre alla procedura di Valutazione d’Impatto Ambientale di competenza delle Regioni.

Nel caso specifico, l’iter di VIA si configura come un endo-procedimento della procedura di Autorizzazione Unica ai sensi del D.lgs. 29 dicembre 2003. In data 21 luglio 2017 è entrato in vigore il d. lgs. n. 104 del 16 giugno 2017 (pubblicato in G.U. n. 156 del 06/06/2017), il quale ha modificato la disciplina inserita nel D.lgs. n.152/2006 in tema di Valutazione di Impatto ambientale (VIA).

Il provvedimento trae origine da un adeguamento nazionale alla normativa europea prevista dalla Direttiva 2014/52/UE del 16 aprile 2014, la quale ha modificato la Direttiva 2011/92/UE concernente la valutazione dell’impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati. Scopo del provvedimento in esame è quello di rendere più efficiente le procedure amministrative nonché di innalzare il livello di tutela ambientale

2. DESCRIZIONE GENERALE DEL PROGETTO

Il sito oggetto dello studio è situato nel Comune di Trapani (TP).

L’area di progetto su cui verrà realizzato il parco eolico è caratterizzata da orografia tipica delle zone collinari della zona, priva di complicazioni eccessive e con un’altezza media compresa tra 126 e 295 metri sul livello del mare.

Attualmente il sito presenta un uso del suolo principalmente agricolo. La copertura vegetale arborea è scarsa, quindi l’area in esame è caratterizzata da una rugosità media, caratteristica favorevole allo sfruttamento del vento.

Le turbine eoliche saranno posizionate in modo omogeneo, in direzione perpendicolare al vento prevalente N-NW.

Per effettuare una localizzazione univoca dei terreni sui quali insiste il parco eolico, di seguito si riportano le cartografie riguardanti:

- sovrapposizione del campo eolico su ortofoto (figura 1);
- sovrapposizione del campo eolico su catastale (figura 2);

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE: AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 4 di 20
--	---	--

- sovrapposizione del campo eolico su CTR (figura 3);
- sovrapposizione del campo eolico su IGM (figura 4).

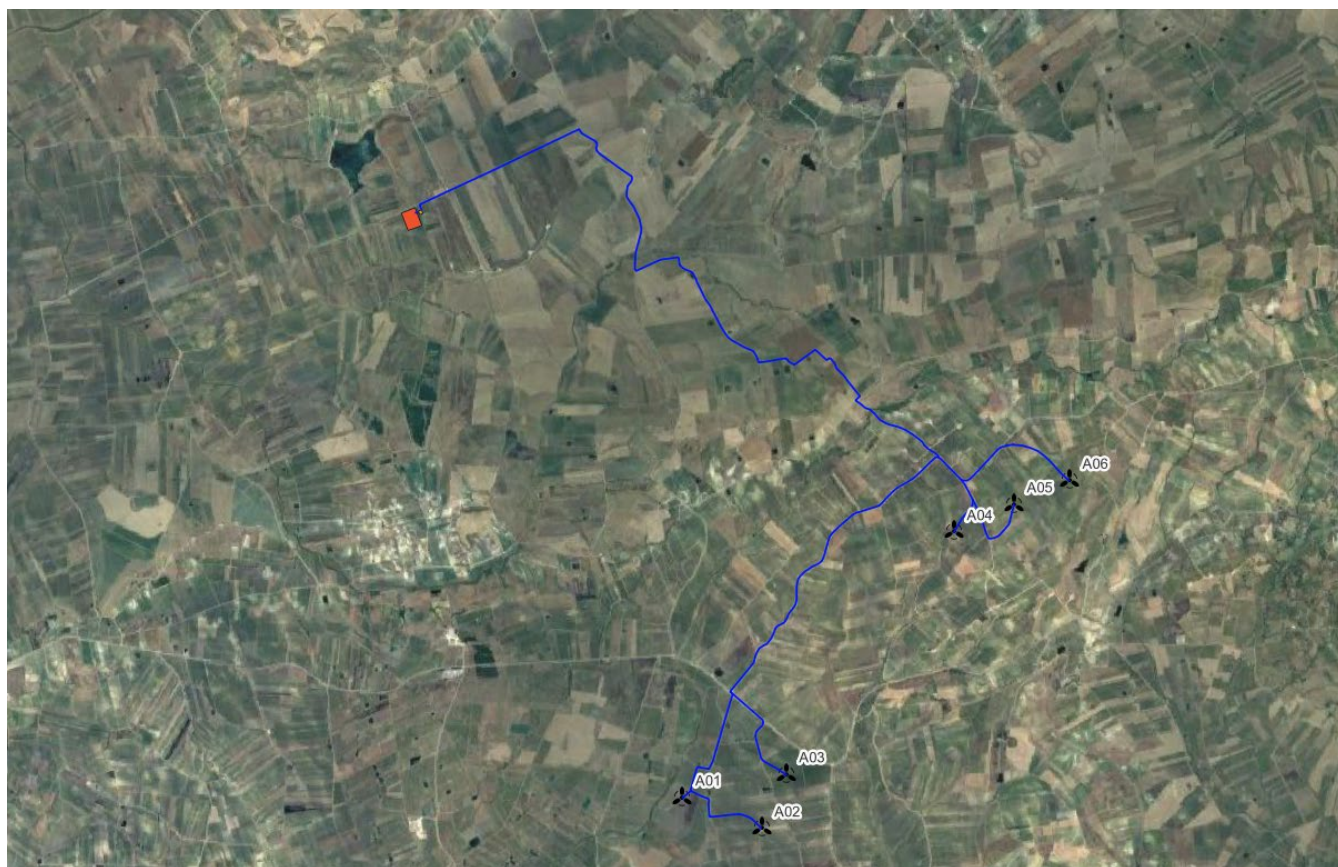


Figura 1 - Inquadramento area parco eolico su base ortofoto

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:

AEI WIND
PROJECT IV S.R.L.

P.I. 16805241003
Via Vincenzo Bellini,
22 00198 Roma

“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

DATA:
FEBBRAIO 2023
Pag. 5 di 20

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

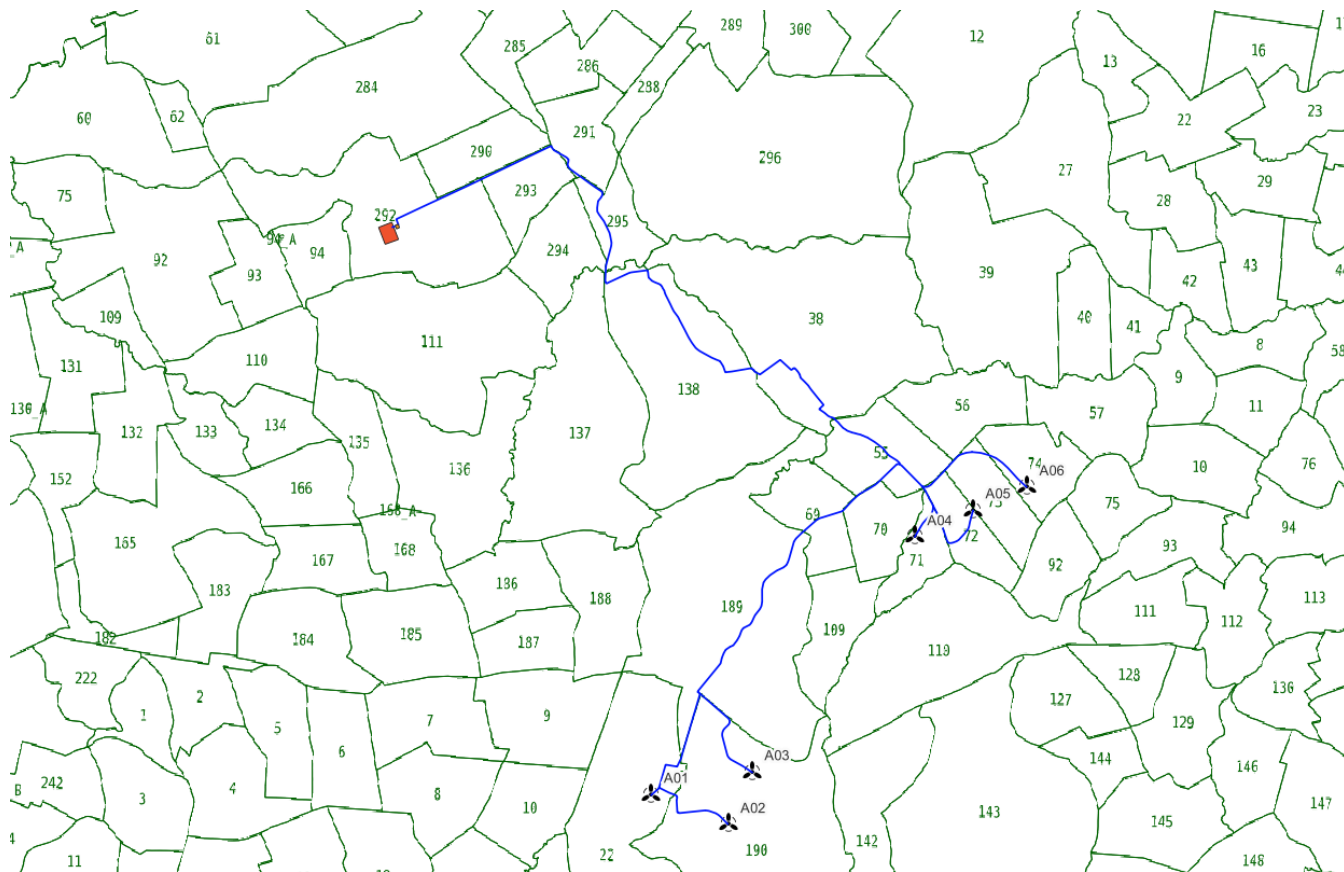


Figura 2 - Inquadramento area parco eolico su catastale

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:



“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

DATA:
FEBBRAIO 2023
Pag. 6 di 20

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

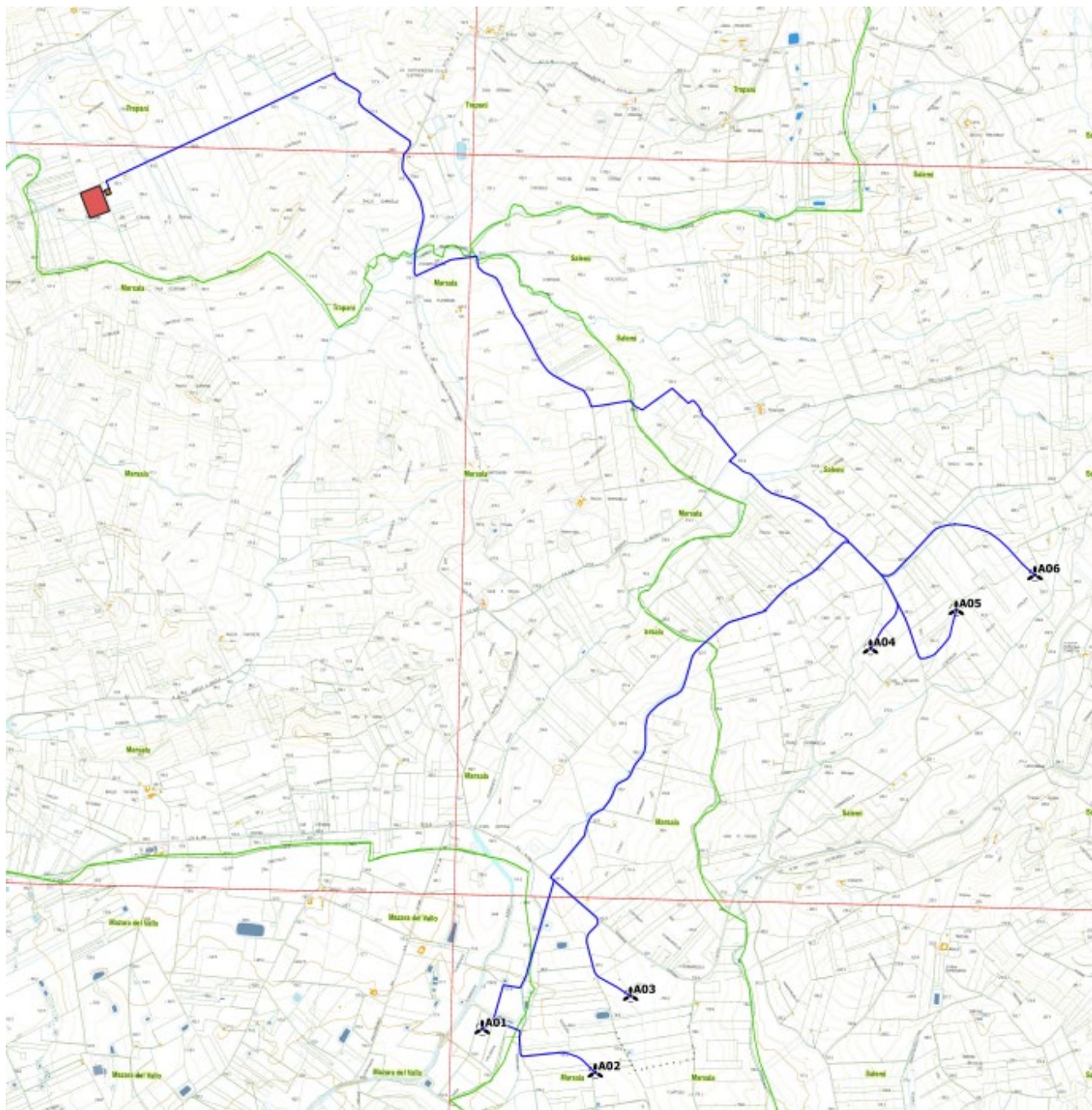


Figura 3 - Inquadramento area campo e sottostazione su CTR

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:



“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

DATA:
FEBBRAIO 2023
Pag. 7 di 20

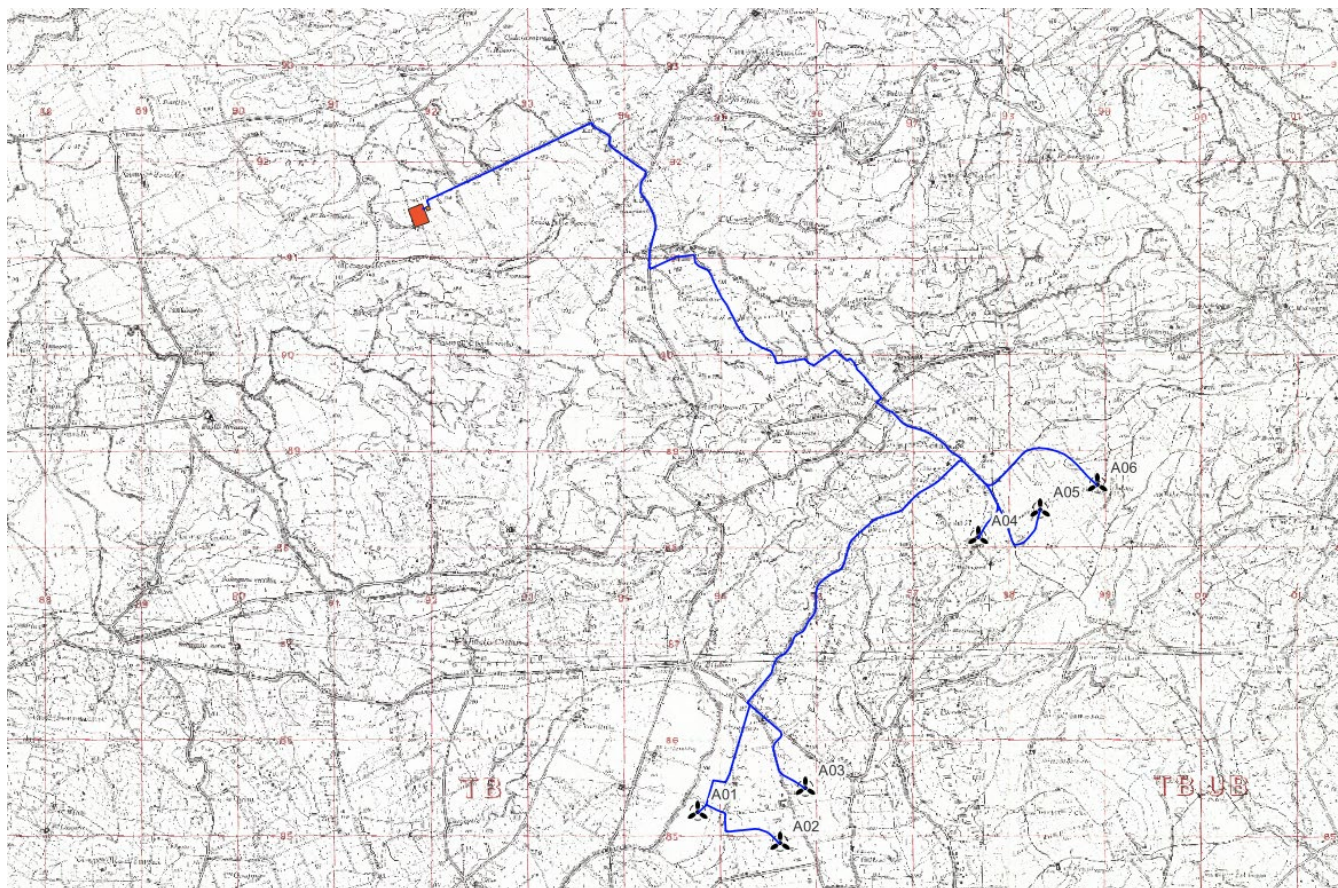


Figura 4 - Inquadramento area campo e sottostazione su IGM

Il parco eolico per la produzione di energia elettrica oggetto di studio avrà le seguenti caratteristiche:

- potenza installata totale: 39.6 MW;
- potenza della singola turbina: 6.6 MW;
- n. 6 turbine;
- n. 1 “Cabina di trasformazione Utente 30kV/36kV”;
- n.1 SSE Lato Utente “Partanna 2”.

I fogli e le particelle interessati dall’installazione dei nuovi aerogeneratori sono sintetizzati nella Tabella seguente.

Aerogeneratore	Foglio	Particella
A01	22	479
A02	190	455
A03	190	215
A04	71	791
A05	72	15
A06	74	41

Tabella 1 – Fogli e particelle aerogeneratori

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 8 di 20
---	---	--

2.1 Iniziativa

Con la realizzazione dell'impianto, denominato “CE PARTANNA II”, si intende conseguire un significativo risparmio energetico, mediante il ricorso alla fonte energetica rinnovabile rappresentata dal vento, tale tecnologia nasce dall'esigenza di coniugare:

- ✓ la compatibilità con esigenze paesaggistiche e di tutela ambientale;
- ✓ nessun inquinamento acustico;
- ✓ un risparmio di combustibile fossile;
- ✓ una produzione di energia elettrica senza emissioni di sostanze inquinanti.

Il progetto mira a contribuire al soddisfacimento delle esigenze di “Energia Verde” e allo “Sviluppo Sostenibile” invocate dal Protocollo di Kyoto, dalla Conferenza sul clima e l'ambiente di Copenaghen 2009 e dalla Conferenza sul clima di Parigi del 2015.

2.2 Attenzione per l'ambiente

Ad oggi, la produzione di energia elettrica è per la quasi totalità proveniente da impianti termoelettrici che utilizzano combustibili sostanzialmente di origine fossile.

L'Italia non possiede riserve significative di fonti fossili, ma da esse ricava circa il 90% dell'energia che consuma, con una rilevante dipendenza dall'estero. I costi della bolletta energetica, già alti, per l'aumento della domanda internazionale rischiano di diventare insostenibili per la nostra economia con le sanzioni previste in caso di mancato rispetto degli impegni di Kyoto, Copenaghen e Parigi.

La transizione verso un mix di fonti di energia e con un peso sempre maggiore di rinnovabili è, pertanto, strategica per un Paese come il nostro dove, tuttavia, le risorse idrauliche e geotermiche sono già sfruttate appieno.

Negli ultimi 10 anni grazie agli incentivi sulle fonti rinnovabili lo sviluppo delle energie verdi nel nostro paese ha subito un notevole incremento soprattutto nel fotovoltaico e nell'eolico, portando l'Italia tra i paesi più sviluppati dal punto di vista dell'innovazione energetica e ambientale.

La conclusione di detti incentivi ha frenato lo sviluppo soprattutto dell'eolico, creando notevoli problemi all'economia del settore.

La società proponente AEI WIND PROJECT IV S.R.L. con sede a Roma in Via Vincenzo Bellini n. 22 si pone come obiettivo di attuare la “grid parity” nell'eolico, grazie all'installazione di impianti di elevata potenza, nuovi aerogeneratori, che abbattano i costi fissi e rendano l'energia prodotta dell'eolico conveniente e sullo stesso livello delle energie prodotte dalle fonti fossili.

3. TIPOLOGIE DI INCIDENTI

La presenza e l'esercizio di un parco eolico, come di qualunque altra attività di produzione industriale, sono inevitabilmente connessi alla probabilità di rischi per le persone o le cose che si trovano nelle sue immediate vicinanze.

Lo scopo sarebbe quello di ridurre i danni, causati da incidenti derivanti da tali installazioni, sino ad un rischio residuale non eliminabile o che si possa considerare accettabile.

Nelle considerazioni entrerebbero sostanzialmente, se non esclusivamente, i requisiti di sicurezza che l'impianto deve assicurare in tutte le fasi della propria vita.

Per raggiungere tale scopo bisogna prima individuare le cause che potrebbero innescare eventuali incidenti.

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 9 di 20
---	---	--

Come ampiamente descritto dagli studi di settore, nel caso di un impianto eolico le cause che influiscono maggiormente sulla probabilità di incidenti sono imputabili ad eventi naturali di straordinaria entità, più raramente ad errore umano, quindi bisogna contestualizzare l'analisi alle peculiarità meteorologiche della zona di impianto.

Individuate le possibili cause e limitando l'analisi alle tipologie di incidenti legati puramente alla fase di esercizio dell'impianto, più che a quelli legati alla fase costruttiva o di dismissione che verranno trattati in specifici documenti in fase esecutiva, si può affermare che la tipologia di incidente di nostro interesse è la rottura degli elementi rotanti come distacco di un'intera pala.

La perdita di integrità strutturale per rotture (di pale, di torre, etc.) in un aerogeneratore può essere ingenerata da

- carenze interne alla macchina per mancato od insufficiente controllo o regolazione dei regimi di funzionamento del rotore durante temporali o tempeste di vento più o meno vigorose; -
- eventi esterni, come fulminazioni o eccessivi carichi eolici, che sempre si manifestano in concomitanza con condizioni meteorologiche complesse o molto forti o, addirittura, eccezionali, pur con i sistemi di controllo e di sicurezza dell'unità perfettamente operativi.

4. ROTTURA ELEMENTI ROTANTI

La seguente analisi scaturisce dai potenziali rischi dovuti alla presenza di componenti di grandi dimensioni in movimento e consiste nello stimare la distanza dall'aerogeneratore all'interno della quale, in presenza di un'eventuale rottura dell'organo rotante della torre eolica, un distacco con lancio di una pala possa rappresentare un rischio.

Queste possono essere strappate dalla loro sede e lanciate con una quantità di moto abbastanza elevata da raggiungere distanze abbastanza importanti.

La traiettoria dipende dall'energia cinetica iniziale al momento del rilascio, dalle condizioni anemologiche, dalle proprietà aerodinamiche dell'elemento e dal punto della circonferenza di rotazione da cui si stacca, oltre dall'altezza della torre e dalla potenza della macchina eolica.

Nella trattazione che segue si adopereranno delle semplificazioni come, per esempio, considerare all'interno del calcolo il contributo degli effetti gravitazionali ed escludere, invece, i contributi aerodinamici.

Tener conto di questi ultimi significherebbe considerare un numero significativo di variabili come, tra le tante, la pala che viene lanciata sia in termini di massa sia in termini di contributi aerodinamici oltre a dover fissare le condizioni di vento all'atto della rottura, alla distribuzione delle velocità lungo il pezzo staccato e la distribuzione delle velocità del vento lungo la traiettoria.

È vero che i contributi aerodinamici potrebbero aumentare il tempo di volo e quindi la gittata ma è anche vero che, per compensare, non varrà tenuto conto della presenza dell'aria che genera comunque delle forze di resistenza viscosse che agendo sulla superficie della pala ne riducono, di conseguenza, tempo di volo e distanza. Inoltre, queste ipotesi risultano conservative considerando che in letteratura si registra, a causa degli effetti di attrito, una diminuzione del tempo di volo anche del 20% (“Blade throw calculation under normal operating conditions” VESTAS AS Denmark July 2001), ponendoci in una situazione di maggiore sicurezza.

Le pale di un aerogeneratore sono fissate al mozzo e vi è un sistema di controllo che ne modifica costantemente l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 10 di 20
---	---	---

medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione.

L'aerogeneratore previsto per la realizzazione del parco eolico è la turbina da 6.6 MW della Siemes-Gamesa (SG 6.6-170 -MOD 6.6 MW).

Nella tabella che segue sono sintetizzate le principali caratteristiche dell'aerogeneratore previsto nel parco eolico CE PARTANNA II.

Altezza al Mozzo	135 m
Diametro Rotore	170 m
Lunghezza singola Pala	83,3 m
Area Spazzata	22,698 m ²
Numero Pale	3
Velocità di Rotazione Max a regime del Rotore	11.20 rpm
Potenza Nominale Turbina	6600 kW
Cut-Out	25 m/s
Cut-in	3 m/s
Posizione Baricentro della pala a partire dalla radice	27,76

Tabella 2 – Caratteristiche principali dell'aerogeneratore previsto nel parco eolico CE PARTANNA II.

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 che potrebbe verificarsi è del tipo “Rottura alla Radice”.

5. FORZE AGENTI SULLA TRAIETTORIA

La determinazione delle forze e dei momenti agenti sulla pala a causa di una rottura istantanea durante il moto rotazionale, come detto precedentemente, è molto complessa.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di lancio e dalle forze generalizzate inerziali agenti sulla pala.

La pala, quindi, quando inizierà il suo moto continuerà a ruotare (conservazione della quantità di moto).

L'unica forza inerziale agente in questo caso è la forza di gravità.

La durata del volo considerato è determinata considerando la velocità verticale iniziale applicata al centro di gravità.

Il tempo risultante è usato per calcolare la distanza orizzontale (gittata) nel piano e fuori dal piano.

La gittata è determinata dalla velocità orizzontale al momento del distacco.

Non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione a 45 gradi e di moto “a giavellotto” del frammento.

Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di queste condizioni è praticamente impossibile: le forze di resistenza viscosa, le azioni del vento ed il moto di rotazione complesso dovuto al profilo aerodinamico della pala, si oppongono al moto riducendone tempo e distanza di volo.

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE: AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 11 di 20
--	---	---

6. ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE E CALCOLO GITTATA IN WORST CASE

Questo tipo di incidente, che comporta il distacco di una pala completa dal rotore dell'aerogeneratore, può essere determinato dalla rottura della giunzione bullonata fra la pala ed in mozzo.

Le pale sono costituite da una parte strutturale (longherone) posizionata all'interno della pala e da una parte esterna (gusci) che ha sostanzialmente compiti di forma.

Le tre parti, il longherone e i due gusci, sono uniti fra loro mediante incollaggio e, alla fine del processo produttivo, costituiscono un corpo unico.

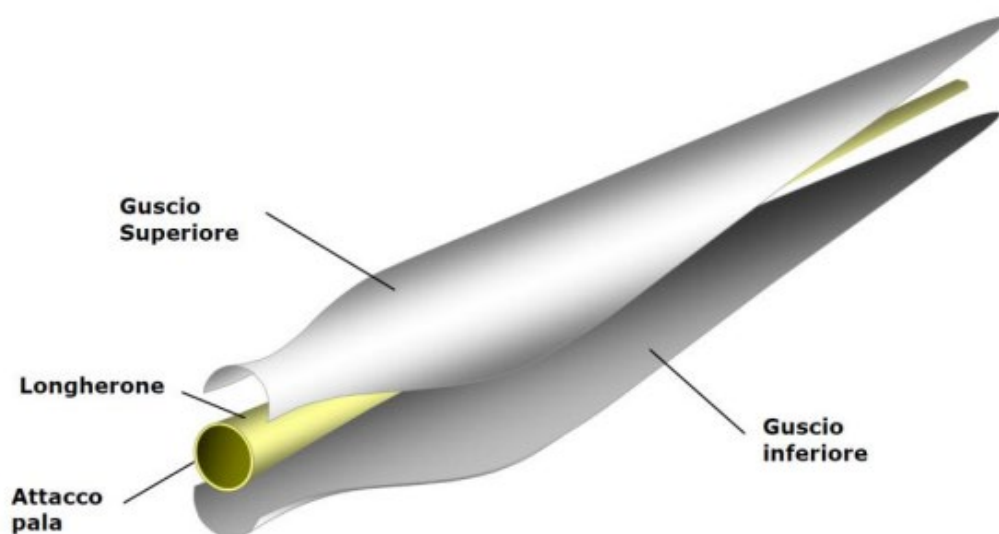


Figura 5 - Composizione di una pala

Il longherone è dotato di attacchi filettati che consentono di collegarlo al mozzo con bulloni (prigionieri) serrati opportunamente durante l'installazione della turbina.

Il precarico conferito ai prigionieri durante il serraggio ha un'influenza determinante sulla resistenza dei prigionieri stessi ai carichi di fatica, 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 e al distacco della pala.

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:

AEI WIND
PROJECT IV S.R.L.

P.I. 16805241003
Via Vincenzo Bellini,
22 00198 Roma

“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

DATA:

FEBBRAIO 2023

Pag. 12 di 20

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

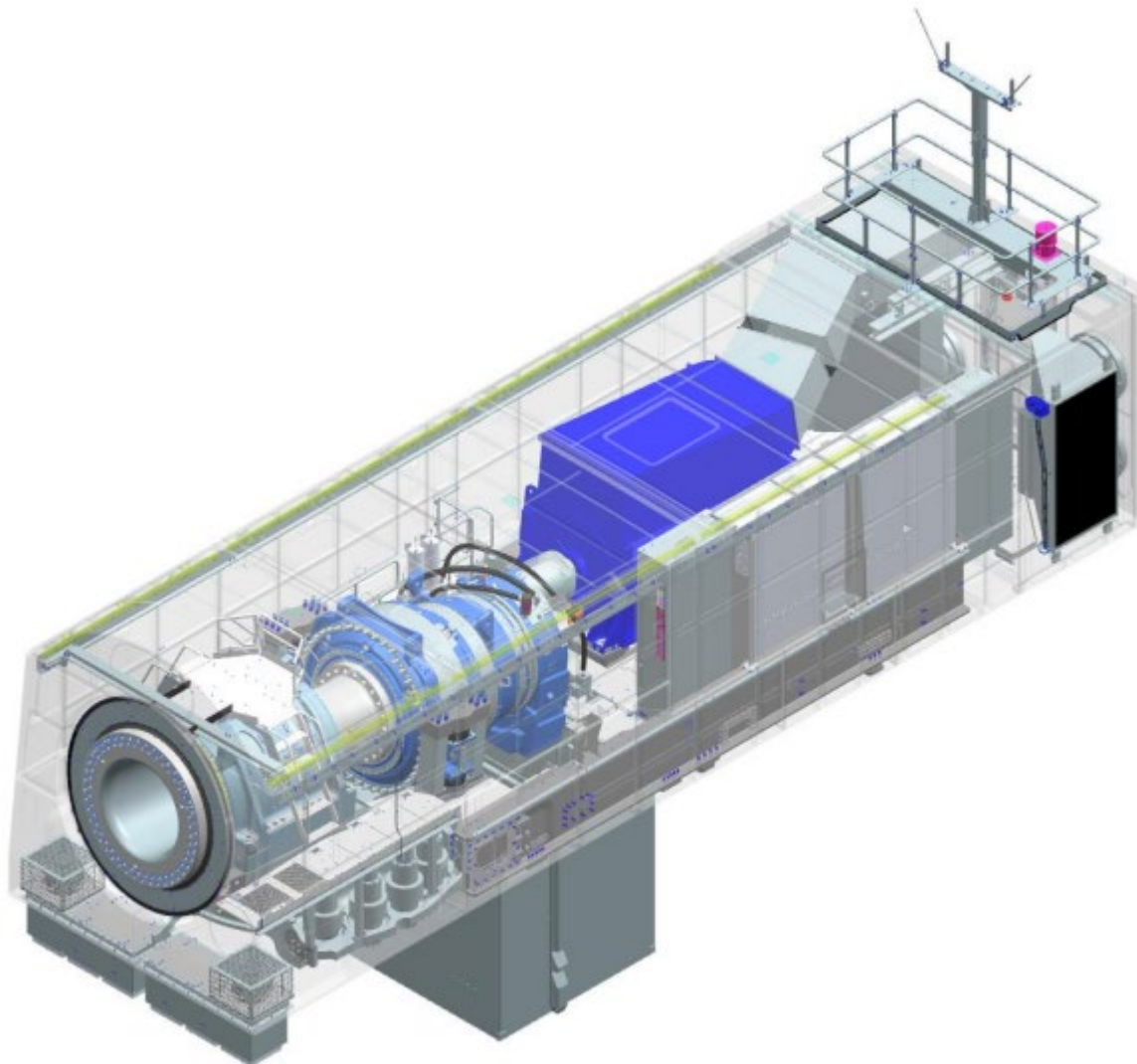


Figura 6 - Disposizione della navicella

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:

AEI WIND
PROJECT IV S.R.L.

P.I. 16805241003
Via Vincenzo Bellini,
22 00198 Roma

“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

DATA:
FEBBRAIO 2023
Pag. 13 di 20

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

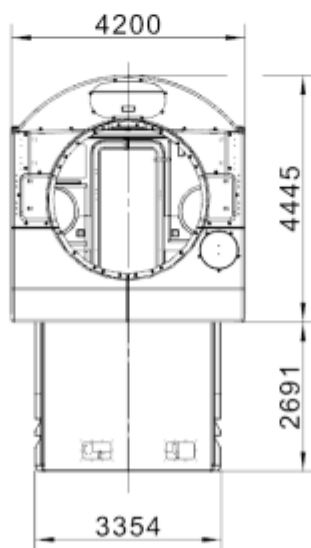
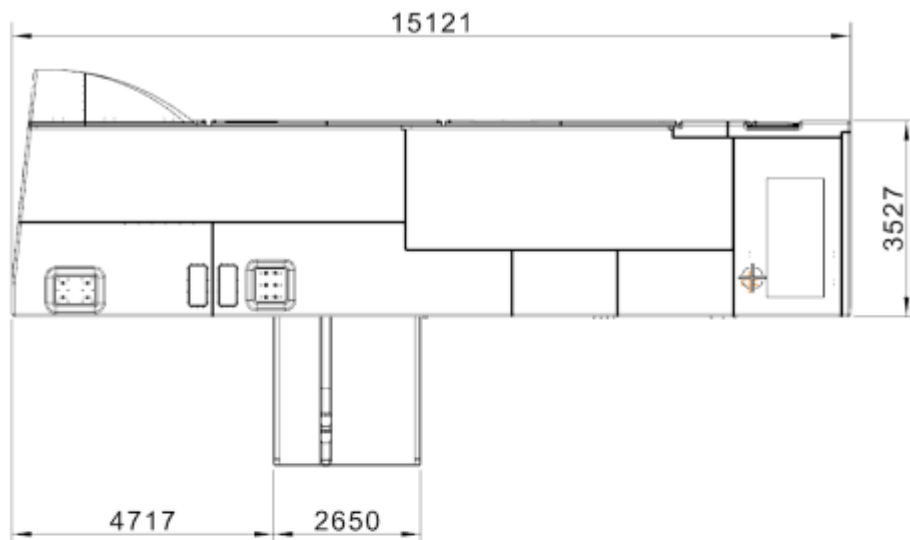


Figura 7 - Dimensioni e pesi della gondola

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:

AEI WIND
PROJECT IV S.R.L.

P.I. 16805241003
Via Vincenzo Bellini,
22 00198 Roma

“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

DATA:

FEBBRAIO 2023

Pag. 14 di 20



Figura 8 - Disegno della lama

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 15 di 20
---	---	---

La tecnologia costruttiva degli aerogeneratori è alquanto sofisticata e di chiara derivazione aeronautica, per cui, la valutazione della gittata massima degli elementi di un aerogeneratore, in caso di rottura accidentale, comporta lo sviluppo di modelli di calcolo articolati e complessi.

I modelli teorici che meglio possono caratterizzare il moto nello spazio dei frammenti di pala o dell'intera pala possono essere ricondotti ai casi seguenti:

1. Primo caso: traiettoria a giavelotto con minore resistenza aerodinamica;
Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, in assenza di moto rotazionale intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria del frammento complanare al rotore.
2. Secondo caso: traiettoria a giavelotto con maggiore resistenza aerodinamica;
Calcolo della gittata massima del generico frammento di ala, sempre in assenza di moto rotazionale, intorno ad un asse qualsiasi, con traiettoria complanare al rotore e frammento ortogonale rispetto al piano del rotore.
3. Terzo caso: calcolo della gittata massima in presenza di moti di rotazione intorno a ciascuno dei tre assi principali del frammento stesso. In caso di rottura, infatti, per il principio di conservazione del momento angolare, il generico spezzone di pala tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano; inoltre, a causa delle diverse pressioni cinetiche esercitate dal vento, lo spezzone di pala tende anche a ruotare intorno a ciascuno dei due assi principali appartenenti al proprio piano.

Le condizioni prese in considerazione nel 3° caso, permettono senza dubbio un calcolo più preciso e maggiormente corrispondente al reale moto di una pala staccatasi dal rotore per cause accidentali e forniscono, sperimentalmente, un valore di gittata di circa il 20% in meno di quella fornita dal caso 1. Come già accennato precedentemente, la risoluzione del 3° caso è però più complessa e richiede la conoscenza di alcune caratteristiche degli aerogeneratori, non sempre fornite dai produttori, poiché oggetto di brevetto. Pertanto si è deciso di utilizzare il 1° caso, di facile soluzione e che fornisce un risultato maggiorato di circa il 20%, garantendo così un ulteriore margine di sicurezza.

6.1 Geometria del problema e calcolo della gittata (1° caso)

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

$$\begin{aligned}\ddot{x} &= 0 \\ \ddot{y} &= -g\end{aligned}$$

Dove $g=9.82 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità. La legge del moto che costituisce soluzione di queste equazioni è:

$$\begin{aligned}x(t) &= x_0 + v_x t \\ y(t) &= y_0 + v_y t - \frac{1}{2}gt^2\end{aligned}$$

Dove (x_0, v_0) è la posizione iniziale del punto materiale, e (v_x, v_y) è la sua velocità. La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $y(T)=0$. Dalla legge del moto si ottiene :

$$T = \frac{v_y}{g} + \frac{1}{g}\sqrt{v_y^2 + 2y_0g}$$

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE: AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 16 di 20
--	---	---

In cui è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

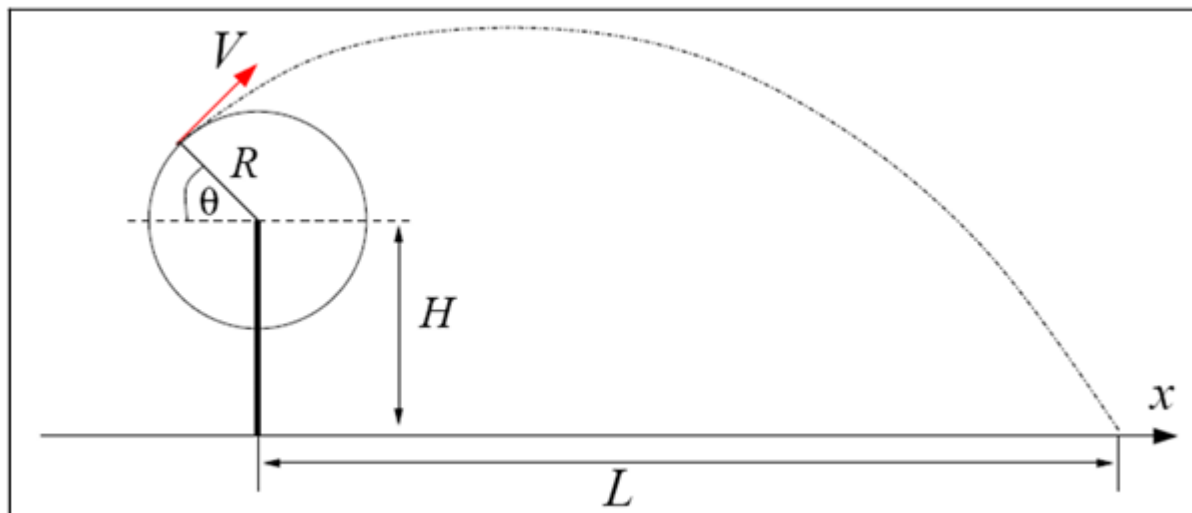


Figura 9 - Schema grafico di gittata

La posizione e la velocità iniziale sono determinate dall'angolo θ e dalla velocità iniziale V del frammento di pala al momento del distacco.

Esse sono legate alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned}x_0 &= -R \cos(\theta) \\y_0 &= H + R \sin(\theta) \\v_x &= V \sin(\theta) \\v_y &= V \cos(\theta)\end{aligned}$$

La gittata L è la distanza dal palo del punto di impatto al suolo del frammento di pala. Dalla legge del moto si ottiene:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per T ricavato sopra, si ricava la gittata L in funzione di V e di θ :

$$L = \frac{V \sin(\theta)}{g} \left[V \cos(\theta) + \sqrt{V^2 \cos^2(\theta) + 2(H + R \sin(\theta))g} \right] - R \cos(\theta)$$

Si noti che, fissato un generico angolo θ , la gittata aumenta quadraticamente con V , salvo i casi particolari $\theta = \pm 90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$, nei quali quest'ultima aumenta linearmente con V oppure è pari ad R . La massima gittata si avrà per $\theta = 45^\circ$ e non quando il proiettile parte parallelamente al suolo.

6.2 Calcolo della gittata massima

Come già precedentemente indicato, il calcolo della gittata massima richiede la conoscenza dei valori H (altezza del mozzo), R (distanza dal mozzo del baricentro del frammento staccatosi dal rotore) e V (velocità di distacco del frammento di pala).

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 17 di 20
--	---	---

I valori di H ed R sono rispettivamente H=135m e Lunghezza della pala=83.3m e per il calcolo della velocità di distacco del frammento di pala si ricorre alla seguente formula:

$$V = \frac{2 \times \pi \times R \times rpm}{60}$$

Il massimo numero di giri per minuto che l'aerogeneratore compie è pari 11,20 giri/min quindi supponendo che la rottura della pala avvenga vicino al mozzo e considerando R=27,76m (lunghezza pala/3), si ottiene una velocità di distacco di circa 32,56 m/s nel baricentro della pala.

Di seguito si riporta il grafico della gittata in funzione dell'angolo e della velocità di distacco.

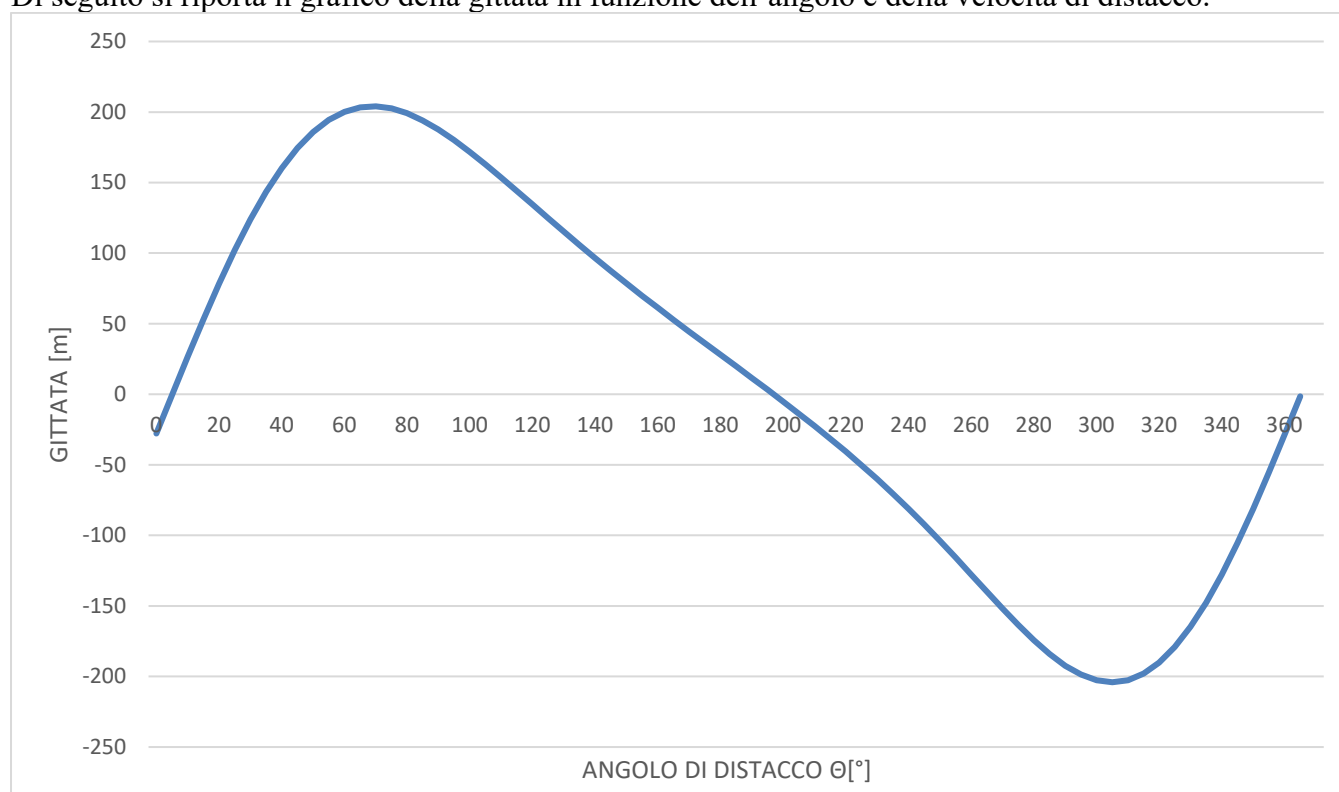


Tabella 3 - Gittata con velocità di distacco 32,56 m/s

Nel grafico si propone la gittata massima nel caso in cui si distacchi l'intera pala dal mozzo con una velocità di 32,56 m/s, che costituisce la massima velocità raggiunta dal baricentro della pala allorquando il rotore compie 11,20 rivoluzioni per minuto.

La gittata massima è di circa 204 m corrispondente ad un angolo di lancio $\theta = 70^\circ$.

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 [rad]	θ [°]	Gittata
0	0	-27,76666667
0,087222	5	-0,573283119

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:



“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)”

Calcolo massima gittata degli elementi rotanti

DATA:
FEBBRAIO 2023
Pag. 18 di 20

0,174444	10	26,51998627
0,261667	15	52,98788218
0,348889	20	78,33306479
0,436111	25	102,1012451
0,523333	30	123,8945341
0,610556	35	143,3825102
0,697778	40	160,3105697
0,785	45	174,5052011
0,872222	50	185,8759323
0,959444	55	194,4138288
1,046667	60	200,186578
1,133889	65	203,3303857
1,221111	70	204,0391171
1,308333	75	202,5513252
1,395556	80	199,1360031
1,482778	85	194,0780239
1,57	90	187,6642738
1,657222	95	180,1713997
1,744444	100	171,8558956
1,831667	105	162,9469579
1,918889	110	153,6422071
2,006111	115	144,1060655
2,093333	120	134,4703456
2,180556	125	124,8364758
2,267778	130	115,2787681
2,355	135	105,8481898
2,442222	140	96,57621526
2,529444	145	87,47845539
2,616667	150	78,55788276
2,703889	155	69,8075668
2,791111	160	61,21290156
2,878333	165	52,75335438
2,965556	170	44,40378829
3,052778	175	36,13542193
3,14	180	27,91649338
3,227222	185	19,71269257
3,314444	190	11,48742455
3,401667	195	3,201966001
3,488889	200	-5,184419115

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 19 di 20
---	---	---

3,576111	205	-13,71432855
3,663333	210	-22,43194197
3,750556	215	-31,38249209
3,837778	220	-40,61133093
3,925	225	-50,16239255
4,012222	230	-60,07581063
4,099444	235	-70,38442059
4,186667	240	-81,10888684
4,273889	245	-92,25128346
4,361111	250	-103,7871625
4,448333	255	-115,6564988
4,535556	260	-127,7543848
4,622778	265	-139,9228726
4,71	270	-151,9457354
4,797222	275	-163,5479307
4,884444	280	-174,4010521
4,971667	285	-184,1351048
5,058889	290	-192,3558021
5,146111	295	-198,6656296
5,233333	300	-202,6864235
5,320556	305	-204,0812476
5,407778	310	-202,5737669
5,495	315	-197,9639092
5,582222	320	-190,1391763
5,669444	325	-179,0814132
5,756667	330	-164,8691492
5,843889	335	-147,6758096
5,931111	340	-127,7642005
6,018333	345	-105,4777304
6,105556	350	-81,22886666
6,192778	355	-55,4853554
6,28	360	-28,75475573
6,367222	365	-1,56785807

Tabella 4 - Valori della gittata con evidenziata quella massima

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it



PROPONENTE:  AEI WIND PROJECT IV S.R.L. P.I. 16805241003 Via Vincenzo Bellini, 22 00198 Roma	“Progetto di realizzazione di un parco eolico della potenza di 39.6 MW denominato “CE PARTANNA II” situato nei comuni di Marsala, Mazara del Vallo e Salemi, in provincia di Trapani (TP)” Calcolo massima gittata degli elementi rotanti	DATA: FEBBRAIO 2023 Pag. 20 di 20
---	---	---

7. CONCLUSIONI

Il valore ricavato è sicuramente compatibile con quello degli studi forniti dalle ditte produttrici.

Si sottolinea che il valore precedentemente calcolato sovrastima quello reale della gittata massima; infatti la presenza dell'aria, genera delle forze di resistenza viscosse che agendo sulla superficie del frammento ne riducono tempo di volo e distanza.

A questa azione vanno aggiunte le forze aerodinamiche di portanza che possono innescarsi sul frammento di pala in virtù del profilo aerodinamico secondo il quale vengono modellate le sezioni trasversali della pala stessa; tale portanza potrebbe addirittura prolungare il volo e allungare la distanza percorsa.

Questa possibilità è correlata, tra l'altro, al rollio, all'imbardata ed all'impennarsi della pala durante il volo.

L'azione della portanza può essere ricondotta e schematizzata nei calcoli con una riduzione percentuale della forza peso.

Avendo ottenuto la lunghezza di circa 204 m e considerando tutte le condizioni più gravose al momento dell'ipotetica rottura, come ad esempio:

- massimo numero di giri del rotore,
- inclinazione della pala corrispondente alla massima velocità,
- esclusione degli effetti dovuti alla resistenza dell'aria che la pala incontra durante la sua traiettoria

PROGETTAZIONE:



EGM PROJECT SRL - Via Vincenzo Verrastro - 15/A- 85100 Potenza
info@egmproject.it - egmproject@pec.it

