



Comune di SAN SEVERO



REGIONE PUGLIA

## PROGETTO DEFINITIVO PARCO EOLICO "AQUILONE 1"

Nel Comune di San Severo

N.29 aerogeneratori di potenza fino a 7,2MW

### CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA PER ROTTURA DEGLI ELEMENTI ROTANTI VERIFICA AI SENSI DEL D.M. 10-9-2010

Committente:



**NVA Aquilone srl**

Via Lepetit, 8

20045 Lainate (MI)

[nvaaquilone@legalmail.it](mailto:nvaaquilone@legalmail.it)

Visti:

Progettazione:



Tecnico Competente:

Ing. Francesco Di Cosmo



Elaborazione: OTTOBRE 2023 rev 4 21-1-2024

## PREMESSA

In riferimento al D.M. 10-9-2010 "*Linee guida per l'autorizzazione degli impianti alimentati da fonti rinnovabili*", allegato 4, punto 7.1 - "*Analisi dei possibili incidenti*" - riporta testualmente: "***E' opportuno prendere in esame l'idoneità delle caratteristiche delle macchine, in relazione alle condizioni meteorologiche estreme del sito. In tal senso: - andrebbe valutata la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentate***".

La presente relazione, dunque, in ottemperanza al D.M. su citato riguarda il calcolo della gittata in caso di rottura di un frammento degli elementi rotanti nell'ipotesi che la rottura avvenga in modo fragile e che i sistemi di controllo quali freno aerodinamico e sistema parafulmine siano completamente fuori servizio.

Il frammento considerato riguarda un pezzo della pala con rottura a m.5 dalla punta della pala, condizione di calcolo che produce la massima gittata nell'ipotesi cautelativa di previsione, ma anche di bassissima probabilità di accadimento stante la tipologia costruttiva degli attuali aerogeneratori.

Per la quantificazione della gittata massima si utilizzerà il modello della "***rotazione complessa del corpo rigido***" basandosi sulle seguenti ipotesi:

1. Il distacco del frammento, e quindi la gittata, è funzione dell'angolo di distacco che l'asse della pala forma con l'orizzontale;
2. Si ipotizza che la sezione di distacco della pala dal resto della struttura sia netta, ovvero che la rottura avvenga in modo fragile senza considerare l'effettiva struttura fibrosa e filamentosa del corpo della pala, immersa in una matrice di resina epossidica.
3. Si tiene conto della resistenza indotta dall'attrito del frammento con l'aria.
4. Si tiene conto della rotazione del pezzo durante il volo.

Il calcolo che segue è stato condotto in maniera molto approfondita, considerando i diversi aspetti fisici ed è stato svolto con molto rigore, tuttavia nella realtà il verificarsi delle cause che portano ad una rottura di un frammento di pala e del conseguenziale urto sono molto improbabili. Con ciò si vuole rappresentare che diversi studi probabilistici hanno concluso che la probabilità che un veicolo possa essere colpito da un frammento di pala, a seguito della sua rottura a 5 metri dalla punta, ha valori estremamente elevati tali da rendere quasi nullo il rischio stesso.

## LE VERIFICHE E LE VALUTAZIONI

Oggetto del presente studio sono la verifica delle distanze del D.M. 10-9-2010 rispetto alle strade statali e provinciali e le valutazioni del rischio della gittata massima rispetto a recettori e strade secondarie, si elencano nell'ordine:

- A. **la verifica** del rispetto del D.M. 10-9-2010 che con l'allegato 4, punto 7.2 impone: *"la distanza di ogni turbina eolica da una strada provinciale o nazionale deve essere superiore all'altezza massima dell'elica comprensiva del rotore e comunque non inferiore a 150 m dalla base della torre"*;
- B. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto alle strade nazionale e provinciali;
- C. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto ai recettori;
- D. la **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto alle strade di livello inferiore alle strade provinciali – **NON è richiesta dal D.M. 10-9-2010 - poiché il rischio dovuto alla concomitanza degli eventi, rottura del frammento di pala a 5 metri dalla punta e la probabilità di caduta dello stesso su un recettore o un veicolo in transito su una strada secondaria è estremamente basso;**
- E. eventuale **valutazione del rischio** rispetto ad una rottura accidentale degli elementi rotanti e la probabilità di intercettare un recettore o un veicolo su una strada.

## GLI AEROGENERATORI

Lo studio che segue viene condotto per l'aerogeneratore avente le seguenti caratteristiche:

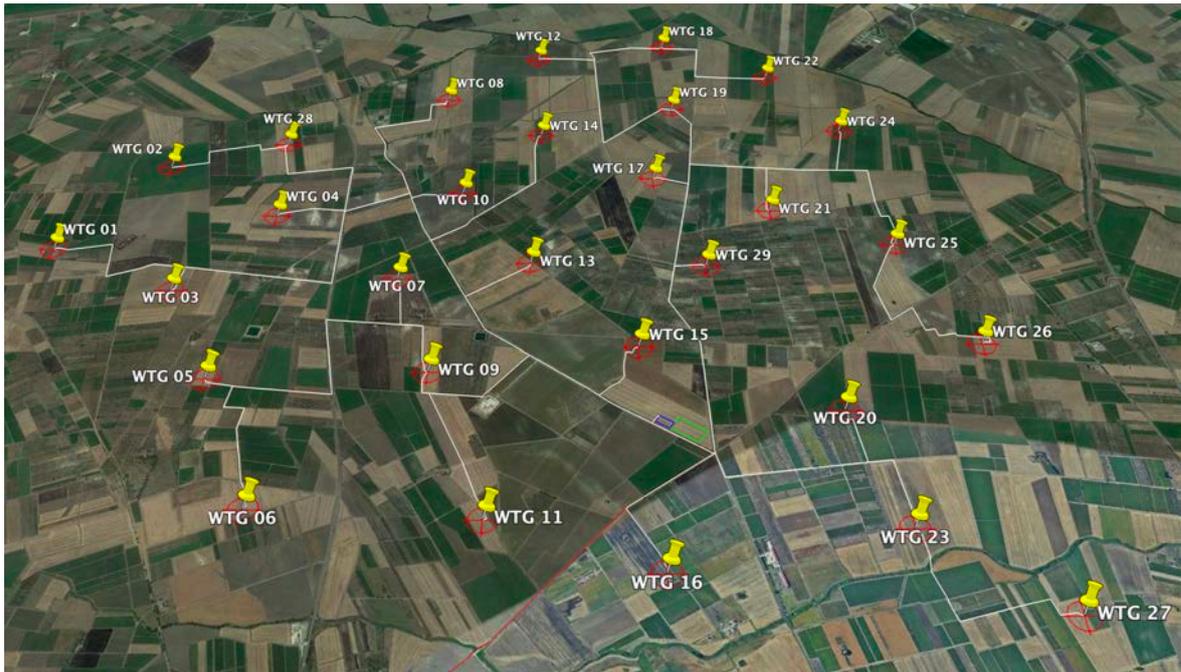
Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
<b>Vestas V172-7.2</b>	7,2	175	172	9,5	261

## INQUADRAMENTO TERRITORIALE

L'area prevista per l'installazione dell'impianto eolico è ubicata a nord del centro abitato di San Severo (FG). L'aerogeneratore n.27 è il più vicino al centro abitato (area industriale) di San Severo e dista circa km 2,2 in linea d'aria.

Il progetto prevede la costruzione di:

- un impianto eolico di 29 aerogeneratori con cabina di trasformazione 0,6/36kV ubicati nel Comune di San Severo.



- i cavidotti di interconnessione in A.T. (36kV) interni all'impianto
- una cabina di raccolta ed elevazione 36/380kV, ubicata in prossimità dell'aerogeneratore WTG 15.
- n. 1 Storage per accumulo energia elettrica (rettangolo colore verde)



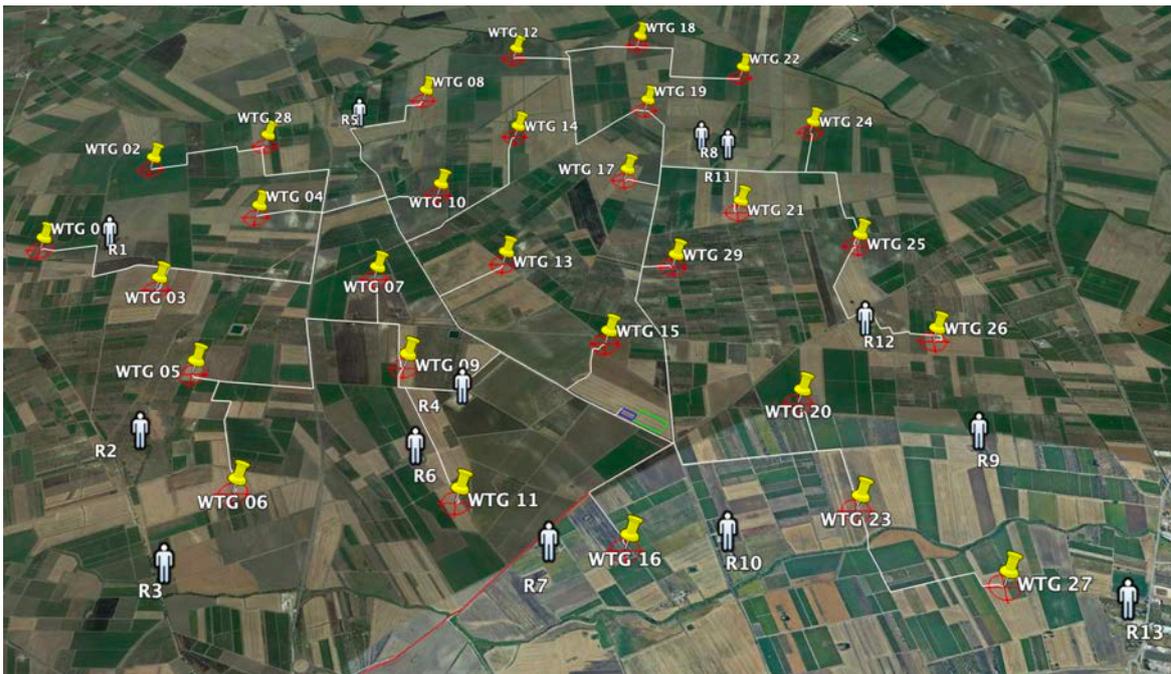
- il cavidotto esterno che parte dalla cabina di interconnessione fino al punto di consegna dell'energia prodotta, previsto nella Stazione Primaria del GSE (Terna SpA). In sostanza il cavidotto sterno sarà costituito da una dorsale principale (in colore rosso nella ortofoto seguente) a 380kV che parte dalla cabina di raccolta e trasformazione 36/380kV e arriva alla sottostazione di consegna al GSE ubicata nel Comune di San Severo.



La numerazione e le coordinate geografiche nel sistema UTM 33N WGS84 sono le seguenti:

TORRE	X	Y
WTG01	525541.3374	4621632.3292
WTG 02	526101.6632	4622575.4295
WTG 03	526465.4741	4621215.0000
WTG 04	527012.1981	4622004.0281
WTG 05	526891.9645	4620417.8581
WTG 06	527352.2307	4619429.5110
WTG 07	527961.5216	4621332.5408
WTG 08	528092.0000	4623481.0000
WTG 09	528264.2397	4620481.0551
WTG 10	528320.0000	4622265.0000
WTG 11	528693.0336	4619364.7909
WTG 12	528790.3723	4624092.6971
WTG 13	528851.0241	4621496.7519
WTG 14	528859.6926	4622994.4152
WTG 15	529578.3577	4620703.0479
WTG 16	529701.0000	4619023.0000
WTG 17	529713.5897	4622450.6767
WTG 18	529833.8838	4624297.4667
WTG 19	529882.7065	4623356.2602
WTG 20	530811.1574	4620177.3583
WTG 21	530543.5232	4622075.9464
WTG 22	530679.1621	4623827.1627
WTG 23	531072.6952	4619317.6135
WTG 24	531177.8613	4623064.1103
WTG 25	531374.0000	4621699.0000
WTG 26	531764.1981	4620739.5277
WTG 27	531840.8394	4618777.8161
WTG 28	526920.9334	4622867.3349
WTG 29	530048.6275	4621472.5878

Nella figura che segue sono rappresentati gli aerogeneratori, i ricettori più prossimi, le strade nazionali e provinciali.



## VERIFICA A - IL RISPETTO DEL D.M. 10-9-2010

Il rispetto del D.M. 10-9-2010 che all'allegato 4, punto 7.2 impone: *“la distanza di ogni turbina eolica da una strada provinciale o nazionale deve essere superiore all'altezza massima dell'elica comprensiva del rotore e comunque non inferiore a 150 m dalla base della torre”*.

Dunque, gli aerogeneratori devono rispettare la distanza minima di m.261 dalle strade provinciali, regionali e nazionali.



Come si può vedere dalla rappresentazione delle distanze su ortofoto nessun aerogeneratore dista meno di 261 metri dalle strade provinciali, regionali o nazionali.

**Si può affermare che la prescrizione del D.M. 10-9-2010 è ampiamente rispettata.**

## CALCOLO DELLA GITTATA MASSIMA

Si calcola ora la gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale del frammento di pala, considerando tale frammento il pezzo estremo con rottura a 5 metri. Si trascurano la gittata per rottura a 10 metri o al mozzo che producono distanze inferiori e, pertanto, la valutazione risulterebbe maggiormente verificata.

Lo studio che segue considera il seguente aerogeneratore:

Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
<b>Vestas V172-7.2</b>	7,2	175	172	9,5	261

### Equazioni del moto - rotazione complessa del corpo rigido

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

$$x = 0$$

$$y = -gt^2$$

dove  $g = 9,8\text{m/s}^2$  è l'accelerazione di gravità. La legge del moto soluzione di queste equazioni è

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

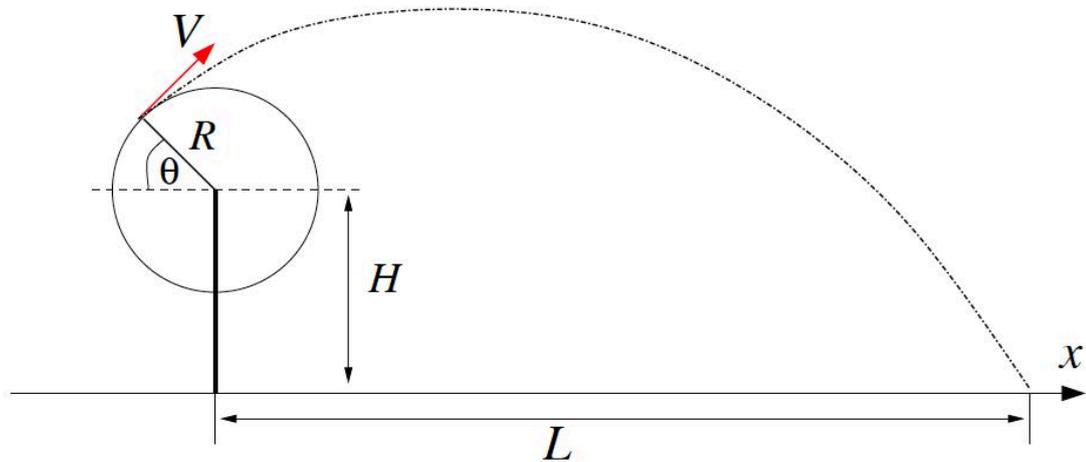
$$y(t) = y_0 + v_y t - \frac{1}{2}gt^2$$

dove  $(X_0; Y_0)$  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

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

dove è stata scartata la soluzione corrispondente a tempi negativi.

## Geometria del problema e calcolo della gittata



La posizione e la velocità iniziale sono determinati dall'angolo  $\theta$ , dalla velocità tangenziale  $V$  del frammento di pala al momento del distacco. Essi sono legati 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 otteniamo:

$$L = x(T)$$

Sostituendo l'espressione per  $T$  ricavata sopra, otteniamo la gittata  $L$  in termini di  $V$  e di  $\theta$ :

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

Si noti che, fissato un generico angolo  $\theta$ , la gittata aumenta quadraticamente con  $V$ , salvo i casi particolari  $\theta = \pm 90^\circ, 0^\circ, 180^\circ$ , nei quali la gittata aumenta linearmente con  $V$ , oppure è pari ad  $R$ .

La formula sopra indicata è funzione dell'angolo di distacco al momento della rottura.

Nella ipotesi che la rottura avvenga nel punto più alto ( $\theta = 90^\circ$  nei grafici) il frammento si distaccherà con velocità parallela al suolo. Questo non è il caso della massima gittata, come si evince dalla formula, ma anche dall'analogia

con elementari problemi di balistica. Nel caso di un cannone che spara in pianura, la massima gittata si ha per  $\theta = 45^\circ$  e non quando il proiettile parte parallelamente al suolo.

Nel caso di una torre eolica la determinazione dell'angolo di massima gittata è leggermente più complesso, ma non è mai pari a  $90^\circ$ . La sua determinazione impone di trovare il massimo della funzione al variare dell'angolo  $\theta$ .

In ogni caso tale relazione è puramente teorica, poiché non tiene conto:

- 1) della riduzione di velocità del pezzo in volo per l'attrito con l'aria
- 2) della rotazione in volo del pezzo che si distacca
- 3) del vento che sposterà il pezzo secondo la sua direzione al quanto variabile spazialmente e sostanzialmente introducendo una ulteriore forza  $Z_0$  perpendicolare al piano di rotazione delle pale
- 4) delle forze che si generano al momento della rottura poiché considera una rottura istantanea
- 5) della morfologia del territorio.

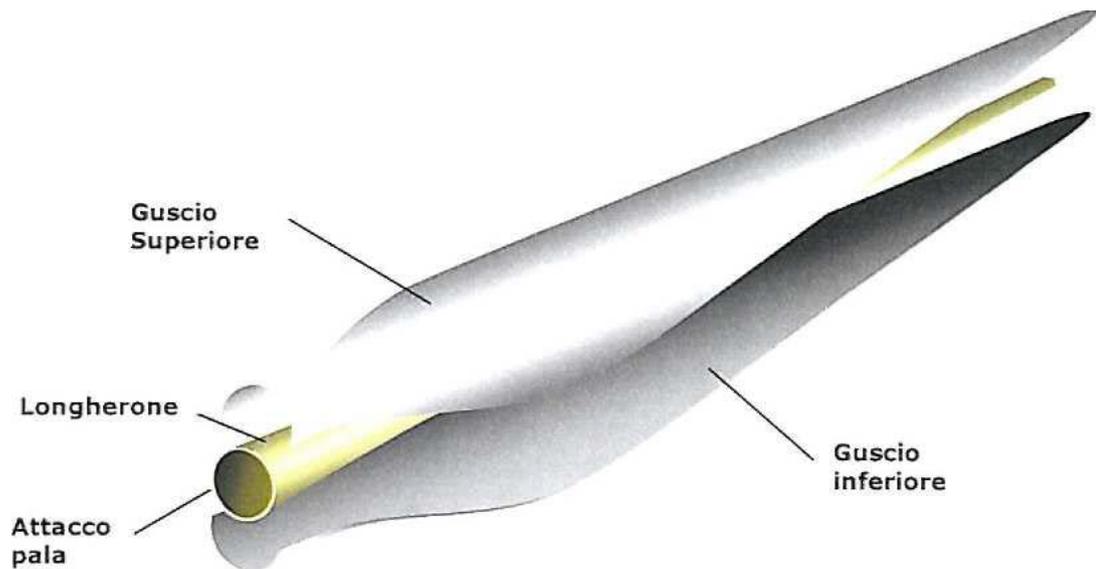
Al fine di addivenire ad una gittata massima più prossima a quella reale, tralasciando esclusivamente l'analisi del punto 5), si hanno le seguenti riduzioni, capaci di riportare il calcolo teorico ad un valore più prossimo a quello reale:

- 1) riduzione della velocità media del pezzo in volo del **30%** per attrito con l'aria;
- 2) riduzione della gittata del **10%** per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza  $Z_0$  praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

Nello studio che segue si opera con una riduzione del **30%** dovuta alle forze di attrito con l'aria del frammento in volo e di un ulteriore **10%** per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza  $Z_0$  praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

#### **Giustificazioni sull'abbattimento del 40% della velocità media del frammento.**

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.



La rottura all'estremità della pala non risulta che si sia mai verificata se non nella ipotesi di concomitanza di fulminazioni di natura atmosferica.

Tutte le pale prodotte 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. E' possibile che frammenti di guscio possano staccarsi, ma si tratta comunque di parti molto leggere in confronto alla resistenza che oppongono all'aria e che quindi non possono essere oggetto di calcoli di gittata come quelli che si possono effettuare sul corpo pala.

Nel calcolo che segue si applicherà la relazione teorica con la sola riduzione del 40% della velocità media del frammento, per tener conto della rotazione del pezzo in volo, della forza  $Z_0$  praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea.

L'aggiornamento tecnologico da parte dei produttori nella costruzione della pala ha ridotto il rischio di rottura accidentale della pala e/o frammento di essa attraverso l'utilizzo di soluzioni costruttive e materiali speciali innovativi tendenti a ridurre la rottura della pala attraverso uno stacco netto della stessa dal mozzo o di porzione di essa. Tra queste soluzioni e materiali annoveriamo l'utilizzo delle resine più recenti, di tutti i tipi, che ha migliorato le proprietà

rispetto a quelle usate in passato, riducendo le possibilità di incidente in generale per le pale; per ridurre anche gli effetti delle conseguentemente più rare rotture i produttori hanno aumentato la plasticità del materiale base e la resistenza della tessitura delle fibre di vetro di rinforzo. In questo modo si riduce anche la caratteristica di fragilità della rottura.

L'incidente per rottura dell'estremità della pala è escluso dai calcoli svolti secondo la norma IEC61400-1, ma si considera per assurdo che possa avvenire in circostanze eccezionali al di fuori di quelle normate.

L'effetto è, una volta assorbita l'energia necessaria per produrre la rottura, che quella rimanente generi per la parte eventualmente distaccata una traiettoria che, dall'intorno del punto più basso, parte in direzione circa orizzontale.

Il percorso in queste condizioni non può che essere una frazione, approssimativamente diminuita del 70% di quanto sarebbe stato quello per lancio balistico dalla parte superiore della rotazione. In questo la resistenza dell'aria offre il suo contributo .

Si ritiene quindi che l'abbattimento della velocità media del frammento del 40% per tener conto dell'attrito con l'aria, della rotazione del pezzo in volo, della forza  $Z_0$  praticata dal vento e delle forze che si generano al momento della rottura che non è mai istantanea, sia più che ragionevole e ampiamente motivata dall'utilizzo delle nuove soluzioni tecnologiche e di materiali costruttivi della pala innanzi suddette, oltre che dall'analisi delle probabilità che tale evento di rottura del frammento, già di per se legato alla probabilità di fulminazione, sia tale da produrre anche un possibile incidente dovuto alla concomitanza di cadere proprio sul recettore, o ancora peggio, sul veicolo di passaggio sulla strada secondaria.

Le forze di attrito, come noto, dipendono da due componenti: una resistenza da attrito viscoso ed una resistenza da pressione.

$$F_{attr.int.} = F_{skin\ friction} + F_{Pressure\ drag}$$

La prima è determinata dalle forze di attrito interne dovute all'elevato gradiente di velocità nello strato di contorno presso il corpo in moto (gli strati di fluido adiacenti al corpo hanno la velocità del corpo mentre gli strati più laterali rispetto al corpo sono in quiete).

La seconda è determinata dalla differenza di pressione tra la parte anteriore e quella posteriore del corpo in moto immerso nel fluido, cioè, è dovuta al fatto che il corpo penetrando nel fluido lo comprime ed il fluido esercita una sorta di risposta a questa compressione forzata.

## LA RESISTENZA DA PRESSIONE

La resistenza alla penetrazione di un corpo in un fluido che deriva dalla differenza di pressione tra la parte anteriore e quella posteriore del corpo dipende dalla densità del fluido, dalla velocità  $V$  relativa tra il corpo ed il fluido e dalla sezione trasversale perpendicolare al flusso  $A$  secondo la relazione:

$$F_{\text{pressure drag}} = - C_d \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

dove:

$F_{\text{pressure drag}}$  = Forza di attrito da pressione [N]

$C_d$  = drag coefficient

$\rho$  = densità aria [Kg/m<sup>3</sup>]

$v$  = velocità relativa all'aria [m/s]

$A$  = area frontale caratteristica del frammento di pala [m<sup>2</sup>]

## LA RESISTENZA VISCOSA

La forza di attrito viscoso dipende dalla viscosità del mezzo, dalla velocità relativa e da un elemento di tipo lineare del corpo:

$$F_{\text{skin friction}} = K \mu v l$$

dove:

$K$  = una costante adimensionale dipendente dalla forma del corpo

$\mu$  = viscosità del mezzo

$l$  = dimensione lineare caratteristica dell'oggetto

$v$  = velocità relativa al mezzo

## LA COMBINAZIONE DEI DUE EFFETTI

La forza di resistenza subita dal corpo in moto nel fluido è data da una combinazione complicata dei due effetti di resistenza alla pressione e resistenza viscosa.

Ma, nel caso di basse velocità, la componente di attrito, che dipende dalla prima potenza della velocità, sarà preponderante rispetto alla resistenza alla pressione che dipende dal quadrato della velocità. Ad alte velocità, ovviamente, accadrà l'opposto.

Poiché i concetti di alta e bassa velocità, sono piuttosto generici, per stabilire in quale delle due situazioni ci si trovi, si introduce un criterio di valutazione basato sul rapporto dei due effetti (numero di Reynolds):

$$Re = (\rho v l) / \mu$$

Il numero adimensionale ( $Re$ ), detto numero di Reynolds, gioca un ruolo assolutamente fondamentale in aerodinamica perché è il termine che determina il tipo di regime nel quale ci si trova ad operare.

Quindi, per movimenti lenti, quando  $Re < 1$  (regime laminare) si trascura la resistenza alla pressione e si tiene conto solo della viscosità mentre, al contrario, per grandi numeri di Reynolds ( $>100$ ) (regime turbolento) si prende in considerazione solo la resistenza alla pressione e si trascura l'attrito interno.

Nel caso specifico, ossia di una pala eolica, il numero di Reynolds viene così calcolato:

$$Re = (\rho v_{max} c) / \mu$$

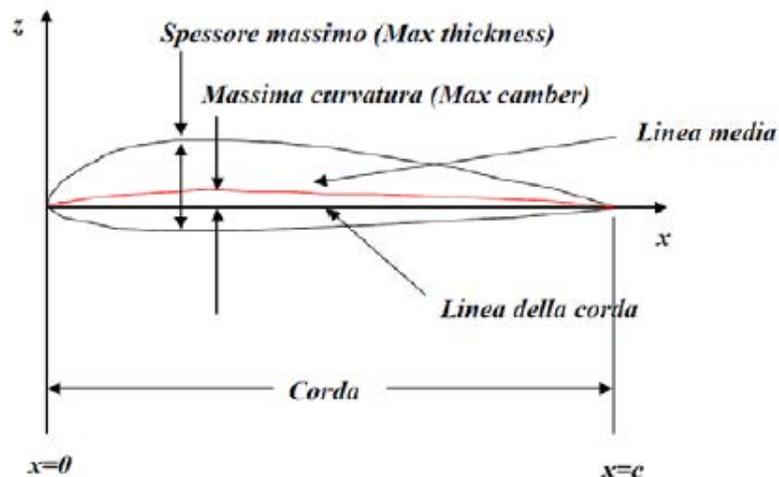
dove:

$$\rho = 1.174 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$v_{max} \cong 40,5 \text{ [m/s]} \text{ (pala intera)} - 97,8 \text{ [m/s]} \text{ (frammento 5 m)}$$

$$c \text{ (corda alare)} \cong 3,7 \text{ [m]} \text{ (pala intera)} - 1,2 \text{ [m]} \text{ (frammento 5 m)}$$

$$\mu = 1.85 \cdot 10^{-5} \text{ [kg/(s m)]}$$



per un valore pari, considerando la temperatura di 25 °C:

$$Re = 9,5E 10^6 - \text{distacco della pala intera}$$

$$Re = 7,4E 10^6 - \text{distacco frammento 5 m}$$

Appare evidente come ci troviamo abbondantemente, per entrambi i casi, in regime turbolento, quindi va considerata esclusivamente la resistenza alla pressione ( $F_{pressure drag}$ ) che corrisponde ad una riduzione della velocità teorica di oltre il 40% come si evince dalla forza di pressione che si oppone.

$$F_{pressure drag} = - C_d \frac{1}{2} \rho v^2 A$$

dove:

$$F_{pressure drag} = \text{Forza di attrito da pressione [N]}$$

$$C_d = \text{drag coefficient}$$

$$\rho = \text{densità aria [Kg/m}^3\text{]}$$

$$v = \text{velocità relativa all'aria [m/s]}$$

$$A = \text{area frontale caratteristica del frammento di pala [m}^2\text{]}$$

Il calcolo per rottura a m.5 dalla punta della pala e per l'aerogeneratore da installare.

Modello	Potenza MW	Altezza mozzo m	Diametro rotore m	Numero di giri al minuto rpm	Altezza massima complessiva m
<b>Vestas V172-7.2</b>	7,2	175	172	9,5	261

Angolo al momento del distacco	Altezza mozzo	lunghezza pala	distanza baricentro del pezzo staccato a 5m dalla punta	raggio al punto di rottura	velocità massima di rotazione e delle pale	tempo per effettuare un giro completo alla massima velocità	velocità iniziale del frammento	coeff. ridotto per attrito con aria	velocità del frammento ridotta per l'attrito con l'aria	forza di gravità	Gittata
$\theta$	H	l	d	R	rpm	t	V1		v	g	L
gradi	m	m	m	m	giri al min	60/giri al min	m/s		m/s		m
5,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	0
10,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	29
15,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	84
20,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	137
25,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	186
30,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	232
35,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	272
40,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	307
45,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	336
50,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	360
55,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	377
60,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	388
65,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	393
70,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	394
75,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	390
80,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	382
85,00	175,00	86,00	3,33	82,67	9,50	6,32	82,20	0,40	49,32	9,80	371

Dunque, nella peggiore delle ipotesi, la gittata massima assume un valore per rottura del frammento a 5 metri dalla punta della pala di **394 metri**.

## VALUTAZIONE B – LA GITTATA RISPETTO AL D.M. 10-9-2010

Gli aerogeneratori sono tutti ad una distanza dalle strade nazionali, regionali e provinciali maggiore di m. 394, con eccezione degli aerogeneratore WTG20 che dista m.310 dalla S.P.32.



In questo caso remoto, di rottura a 5 metri dalla punta della pala, gli aerogeneratori rispettano le distanze di sicurezza con eccezione dell'aerogeneratore WTG20.

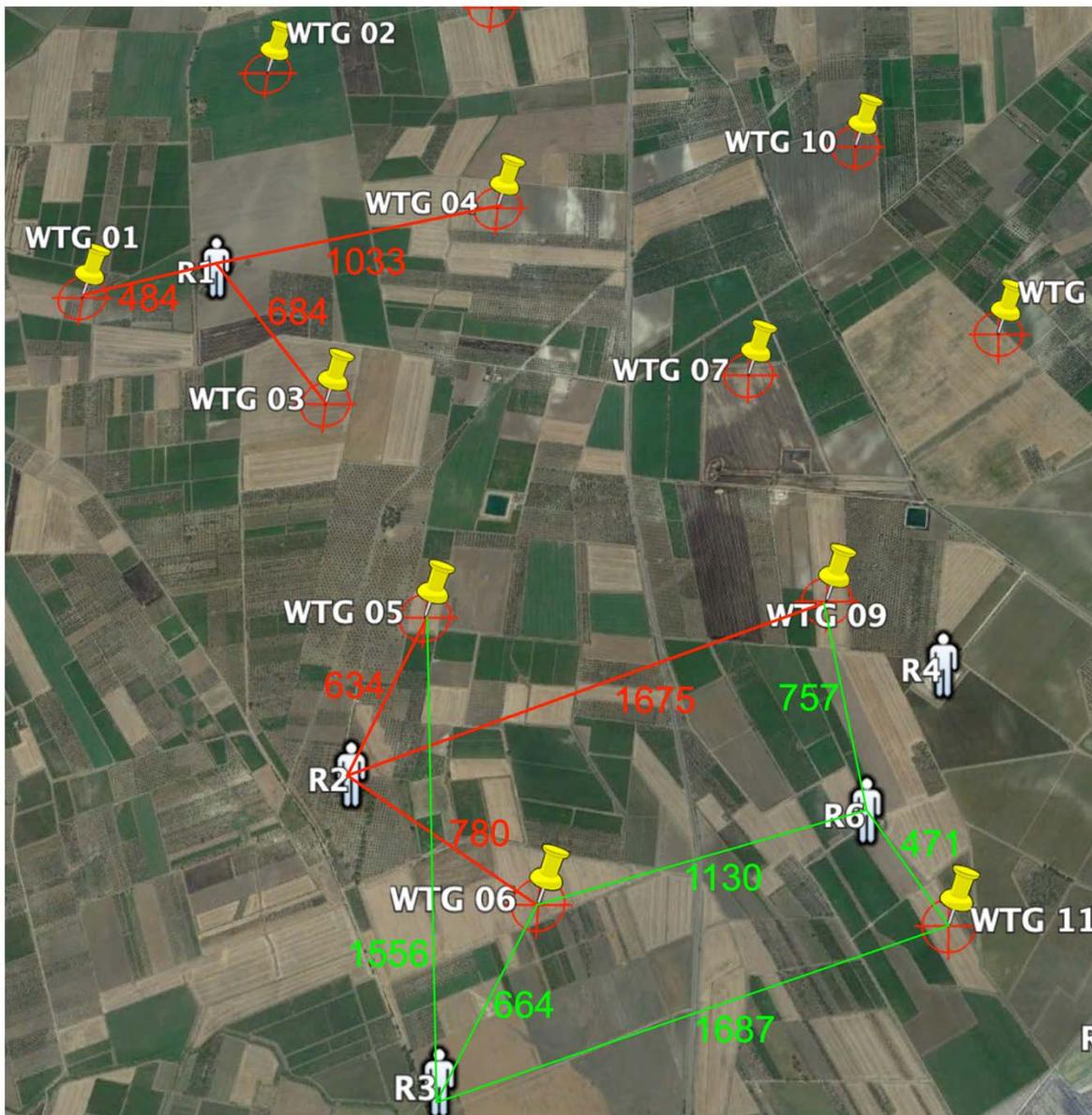
Va evidenziato che il D.M. 10-9-2010 prescrive solo una distanza minima pari alla lunghezza delle eliche con il rotore che al massimo è [m.261](#).

Nel seguito trattandosi di sicurezza e, dunque, di un bersaglio non stabile ma mobile quale deve considerarsi una autovettura in transito su una strada provinciale, si procederà ad una valutazione del rischio di collisione, verificando la sua percentuale di probabilità.

Dunque la valutazione della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale è sicuramente positiva rispetto alle strade nazionali, regionali e provinciali. Si dimostrerà nel proseguo che anche per l'aerogeneratori WTG20 la sicurezza è garantita trattandosi di un rischio altamente accettabile.

## VALUTAZIONE C – LA GITTATA RISPETTO AI RECETTORI

La **valutazione** della gittata massima del frammento degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale rispetto ai ricettori vede la seguente situazione.





## VALUTAZIONE D – LA GITTATA RISPETTO ALLE STRADE SECONDARIE

La **valutazione** della gittata massima degli elementi rotanti in caso di rottura accidentale (del frammento a 5 metri dalla punta della pala), rispetto alle strade di livello inferiore alle strade provinciali – **NON è richiesta dal D.M. 10-9-2010 - poiché il rischio dovuto alla concomitanza degli eventi, rottura del frammento di pala a 5 metri dalla punta e caduta dello stesso sul punto in cui transita il veicolo in una strada scarsamente percorsa è estremamente basso.**

## VALUTAZIONE E – VALUTAZIONE DEL RISCHIO

L'obiettivo di questa sezione del documento è quello di effettuare un confronto con i criteri di accettabilità del rischio che vengono comunemente adottati.

Il rischio non è una grandezza fisica misurabile di tipo tradizionale ma può, tuttavia, essere assimilata ad una grandezza di natura deterministica, probabilistica o possibilistica.

La classica definizione di Rischio Individuale (RI) che si trova in letteratura è la seguente:

*“frequenza a cui ci si aspetta che un individuo sia sottoposto a un certo livello di danno a causa di un incidente in un’industria a rischio di incidente rilevante”.*

Di solito si considera il rischio di morte e normalmente è espresso come morti all’anno per persona, ossia come numero di impatti con esiti fatali all’anno. Il RI è quello a cui è sottoposto un singolo individuo in un dato periodo di tempo e riflette la severità del pericolo e il tempo in cui l’individuo è in prossimità dell’impianto. La valutazione e limitazione del rischio individuale è molto simile in molti Paesi Europei e non Europei e, in particolare, il valore di RI accettabile varia tra valori di  $10^{-5}$  morti/anno e  $10^{-6}$  morti/anno (impatti fatali/anno).

In tale panorama il livello di riferimento per valutare l’alterazione delle condizioni di sicurezza è il rischio naturale, cioè quello cui è esposto ogni individuo per il solo fatto di vivere a contatto con il mondo naturale. Secondo lo studio citato, analizzando i dati e partendo da un valore di rischio (espresso in morti per anno) di circa  $10^{-6} / 10^{-5}$  per catastrofi naturali,  $10^{-6} / 10^{-3}$  per attività non lavorative,  $10^{-5} / 10^{-3}$  per attività lavorative,  $10^{-4} / 10^{-2}$  per senescenza e malattie, si è arrivati all’adozione piuttosto comune di un livello di riferimento del rischio individuale tollerabile generato da attività umane create da terzi pari a  $10^{-6}$ .

Nella tabella seguente sono riassunti i valori di RI considerati accettabili e non accettabili per i Paesi che hanno deciso di adottare un criterio basato sul

rischio. Dall'analisi di questa tabella si evince come la maggior parte dei Paesi presi in esame consideri accettabile un valore di rischio individuale inferiore a  $10^{-6}$  morti/anno (impatti fatali/anno). Questo non stupisce anche perché secondo uno studio di G. Bello il livello di riferimento per l'accettabilità dei rischi individuali dovrebbe essere dell'ordine di  $10^{-6}$  in quanto questo valore è inferiore da 1 a 10 volte al rischio di morire a causa di una catastrofe naturale, da 1 a 100 volte inferiore al rischio di essere vittima di un'attività non lavorativa, da 10 a 1000 volte inferiore al rischio lavorativo, da 100 a 1000 volte inferiore al rischio di senescenza e malattia per soggetti nella fascia d'età media. Sul valore limite di inaccettabilità, invece, il valore varia tra  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$  e in alcuni Paesi il limite non è specificato.

	RI (morti/anno/per sona) Soglia di Accettabilità	RI (morti/anno/persona) Soglia di Non Accettabilità
Olanda	$10^{-6}$	$10^{-5}$
UK	$10^{-6}$	$10^{-4}$ (pubblico)- $10^{-3}$ (lavoratori)
Canada	$10^{-6}$	$10^{-4}$
Australia	$10^{-6}$	Non Utilizzato
Russia	$10^{-6}$	$10^{-4}$
Hong Kong	$10^{-5}$	Non Utilizzato

Per la situazione italiana, riassumendo, la soglia di accettabilità per il rischio individuale pari a  $10^{-6}$  morti/anno, già utilizzata negli altri Paesi, si può considerare abbastanza ragionevole, basti pensare che in Italia ogni anno, solo per l'incidentalità stradale, si ha in media un rischio individuale di morte pari a circa  $2 \times 10^{-4}$  morti/anno/persona (dati ISTAT per il 2001).

In considerazione di tutto quanto sopra, e della scelta di procedere all'analisi del rischio mediante la definizione del rischio individuale, si precisa che i valori di rischio individuale cui si farà riferimento sono quelli che esprimono la stima del pericolo che un individuo corre a seconda della sua posizione nella zona d'impatto determinata dal raggio di massima gittata per un elemento di 5 m dalla punta ed il valore di soglia di accettabilità del rischio individuale, andando quindi a determinare l'area di raggio, dalla base torre, entro la quale il rischio eccede tale valore ( $10^{-6}$  morti/anno).

Poiché trattasi di calcoli che, seppure non complessi, risultano lunghi e con una elevata mole di variabili, l'esito degli stessi viene riportata in forma tabellare.

### Valutazione della collisione con bersaglio mobile (veicolo su strada)

Gli aerogeneratori sono tutti ad una distanza dalle strade nazionali, regionali e provinciali maggiore di m. 394, con eccezione dell'aerogeneratore WTG20. Considerato che tra tutti gli aerogeneratori il WTG20 è il più prossimo ad una

strada e dista m.310 dalla S.P.32, si procederà alla valutazione del rischio per il suddetto aerogeneratore.

Dunque con una ubicazione inferiore alla gittata massima si provvede a sviluppare il calcolo della probabilità che il frammento avrebbe nell'intercettare un veicolo mobile su una strada provinciale.

Pertanto l'analisi delle probabilità deve contemplare la probabilità che si producono contemporaneamente tutti i seguenti eventi:

1. Probabilità che il fulmine colpisca la pala
2. Probabilità che il fulmine colpisca la pala a 5 metri dalla punta
3. Probabilità che il frammento si rompa per rottura improvvisa (nella realtà ciò non avviene)
4. Probabilità che il frammento colpisca la strada provinciale o nazionale
5. Probabilità che il frammento colpito da fulminazione cada nel punto in cui nello stesso istante transita il veicolo.

Si comprende facilmente l'eccezionalità di un simile evento o meglio della concomitanza di 5 fattori che contestualmente devono accadere affinché si verifichi la collisione.

Tutte le pale prodotte dai maggiori produttori di aerogeneratori, comunque, 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.

Frammenti di pala, infatti, solitamente di piccole dimensioni, per la maggior parte staccatisi a causa di azioni esterne (tipica la fulminazione atmosferica) o imperizia umana, sono stati ritrovati a non più di 60-70m dalla base dell'aerogeneratore.

Gli aerogeneratori dove il rischio risulta più alto è rappresentato dall'aerogeneratore n.20 per una distanza di m.310 dalla SP32. Trattandosi in tutti i casi di strade provinciali, si conduce la verifica per l'aerogeneratore n.20 maggiormente a rischio.

La valutazione del rischio per l'aerogeneratore n.20 e la SP32 ha prodotto i seguenti valori:

Distanza dalla Torre	310	m	WTG 20	SP 32
N. Veicoli/h =	50	veic./h		
Numero Occupanti/Veicolo =	2			
Lunghezza tratto stradale inter. =	730	m		
Larghezza tratto stradale inter. =	4	m		
Velocità veicoli =	60	km/h		
Area unitaria impatto (25)=	25	m <sup>2</sup>		
Impulso della Forza =	4,62E+04	N		
<b>Risck of Impact</b>	<b>7,25E-12</b>	N. impatti anno	<	<b>1,00E-06</b>

Il rischio che il frammento ha di incontrare un'auto in transito lungo la S.P.32 risulta inferiore a  $10^{-6}$ , dunque un rischio ampiamente trascurabile per l'aerogeneratore WTG20 e ancor più trascurabile per tutti i restanti aerogeneratori.

## CONCLUSIONI

In conclusione, da quanto sopra, discende che gli aerogeneratori non destano il ben che minimo rischio relativo a possibili incidenti per distacco di pala o frammenti di essa.