

REGIONE SICILIA

Libero Consorzio Comunale di Trapani
COMUNI DI TRAPANI, SALEMI, MISILISCEMI E MARSALA

PROGETTO

INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI"



PROGETTO DEFINITIVO

COMMITTENTE



ENGIE Rinnovabili S.p.A.
Viale Giorgio Ribotta, 31
00144 Roma

PROGETTISTA



Hydro Engineering s.s.
di Damiano e Mariano Galbo
via Rossotti, 39
91011 Alcamo (TP) Italy



OGGETTO DELL'ELABORATO

RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI

REV.	DATA	ATTIVITA'	REDATTO	VERIFICATO	APROVATO					
0	01/2023	PRIMA EMISSIONE	PD	VF	MG					
CODICE PROGETTISTA		DATA	SCALA	FORMATO	FOGLIO	CODICE COMMITTENTE				
RST-SA-R0013_R0		01/2023	-	A4	1 di 26	IMP.	DISC.	TIPO DOC.	PROGR.	REV.

NOME FILE: RST-SA-R0013_Relazione gittata massima elementi rotanti.dwg

ENGIE Rinnovabili S.p.A. si riserva tutti i diritti su questo documento che non può essere riprodotto neppure parzialmente senza la sua autorizzazione scritta.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	2

1	PREMESSA.....	3
2	STORICO DEGLI INCIDENTI.....	5
3	CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE	6
4	AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO.....	8
5	DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE	9
6	ROTTURA PALA	11
6.1	FATTORI CHE INFLUENZANO LA GITTATA.....	11
6.2	MOTO ROTAZIONALE COMPLESSO	12
6.3	ROTTURA DELLA PALA ALLA RADICE	13
6.4	DETERMINAZIONE GITTATA AEROGENERATORE D=175 M.....	16
7	CONCLUSIONI	18
8	ALLEGATO 1 – INDIVIDUAZIONE GRAFICA DELLA GITTATA SU CTR	20



CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	3

1 PREMESSA

La società Engie Rinnovabili Spa è proprietaria del parco eolico denominato “*Salemi Trapani*” avente una potenza complessiva di 66,25 MW. La società Hydro Engineering s.s. è stata incaricata di redigere il progetto definitivo relativo all’integrale ricostruzione dell’esistente impianto eolico.

L’impianto eolico oggi in esercizio trova la propria ubicazione nei territori dei Comuni di Salemi, Trapani e Misiliscemi (quest’ultimo istituito nel febbraio del 2021) facenti parte del Libero consorzio comunale di Trapani, ed è costituito da n. 36 aerogeneratori di fornitura Vestas Italia S.r.l., di cui:

- ✓ n. 31 della tipologia V90, in grado di produrre una potenza nominale di 2,00 MW,
- ✓ n. 5 della tipologia V52 capaci di sviluppare una potenza nominale di 0,85 MW;

la potenza complessiva del Parco esistente ammonta, quindi, a 66,25 MW.

L’energia prodotta viene convogliata, attraverso apposito elettrodotto interrato in MT a 30 kV, presso la Sotto-Stazione Elettrica di Utente, SSEU, 30/150 kV, ubicata, oggi, in territorio del Comune di Misiliscemi (all’epoca della realizzazione del Parco, la SSEU ricadeva in territorio del Comune di Trapani, Frazione di Fulgatore e per questo motivo era stata denominata SSEU di Fulgatore). L’impianto è entrato in esercizio il 23 novembre del 2009.

Il progetto di integrale ricostruzione consiste nello smantellamento degli aerogeneratori esistenti e nella installazione di n. 18 aerogeneratori, di potenza pari a **7,2 MW** per una potenza complessiva di nuova installazione di **129,6 MW**, di cui:

- ✓ Parco Salemi - n. 10 aerogeneratori saranno serviti da un nuovo elettrodotto interrato in MT da 30 kV, che convoglierà l’energia prodotta presso una nuova SSEU 30/150 kV che sarà realizzata nei pressi della Stazione Elettrica Terna denominata “Partanna 2” (questa nuova SSEU sarà realizzata nel territorio del Comune di Marsala);
- ✓ Parco Trapani - n. 8 aerogeneratori saranno serviti da un nuovo elettrodotto interrato in MT da 30 kV che vettorierà l’energia prodotta presso la esistente SSEU 30/150 kV di Misiliscemi (ex Fulgatore) che non subirà alcun ampliamento.

La presente relazione costituisce lo studio della distanza massima raggiungibile dalla rottura di una pala o di un frammento di essa (gittata massima).

In qualsiasi caso, la gittata massima e la velocità all’impatto sono dei fattori determinanti per la stima del rischio. Il calcolo presenta alcune complessità in quanto le variabili in gioco sono

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	4

numerose ed il risultato può essere soltanto di tipo probabilistico in quanto legato alle modalità ed al momento del distacco. Infatti, un corpo lanciato in aria in presenza di forte vento potrebbe dar luogo ad effetti di "portanza" che possono prolungare i tempi di volo. L'effetto viscoso dell'aria, d'altra parte, ha un effetto opposto frenando il corpo stesso. Considerando, quindi, la natura della pala avente un profilo aerodinamico, lo studio del moto risulta complesso, a causa di tutte le forze e dei momenti che nascono al momento del distacco e nell'interazione col vento.



CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	5

2 STORICO DEGLI INCIDENTI

Il tasso d'incidentalità, nell'ultimo decennio, è ancora diminuito a seguito dell'evoluzione tecnologica e del miglioramento delle macchine eoliche, malgrado l'aumento medio delle loro dimensioni.

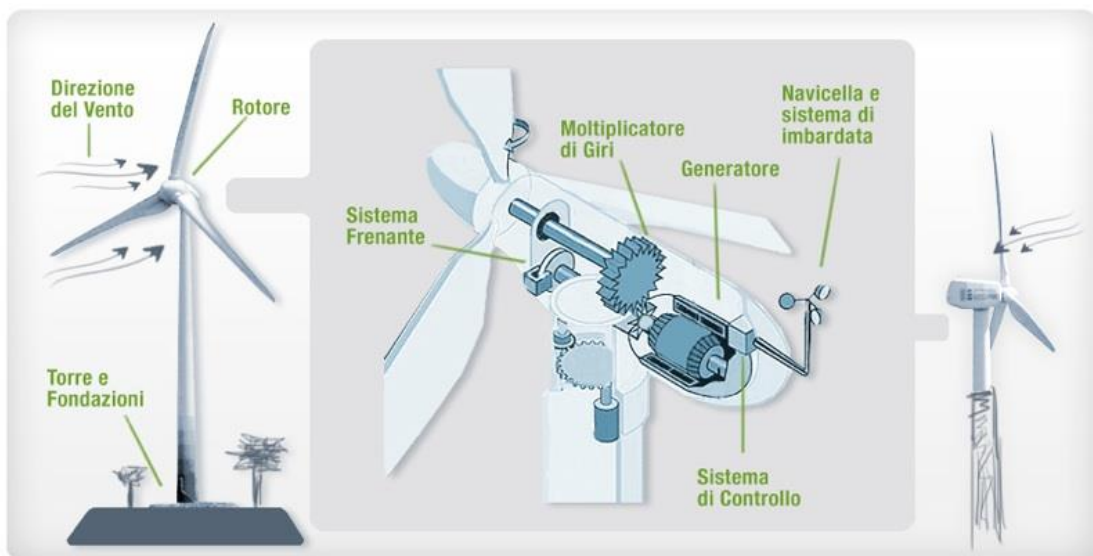
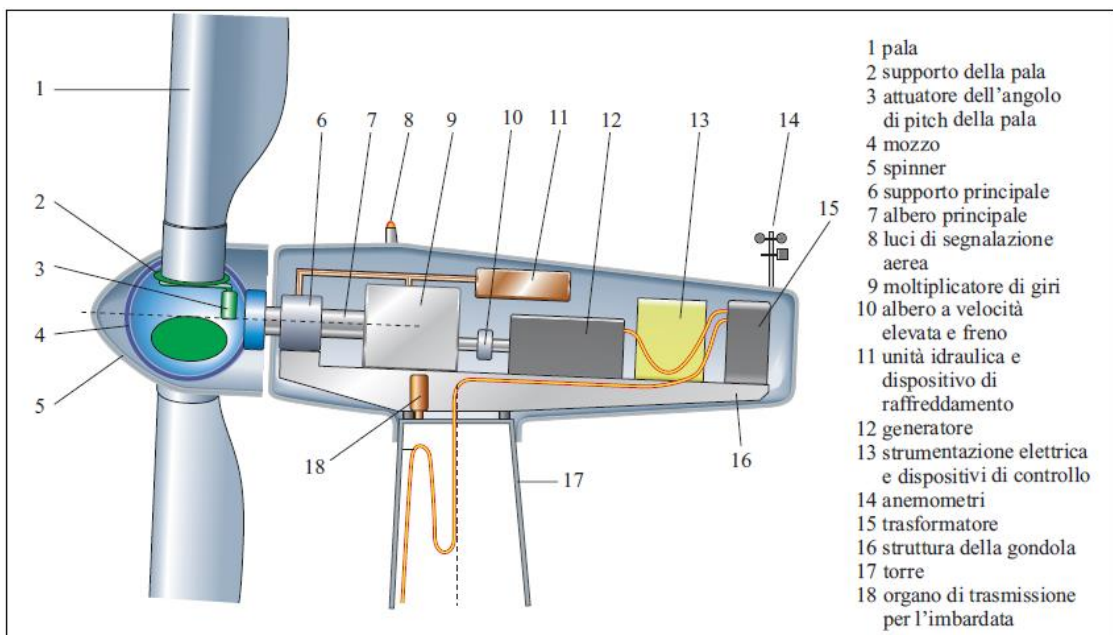
Uno studio danese ha condotto su 18 mesi, tra il 1998 e i 1999, un'analisi riguardante le pale, le navicelle e le torri di 2.130 rotori, per una produzione complessiva di 540 MW. Su 3.195 anni cumulati di funzionamento, solo 7 incidenti hanno comportato la distruzione delle pale. Il tasso è dunque di un incidente ogni 457 anni-macchina. Si noti che la Danimarca presenta maggiori rischi di guasti e di sospensione della produzione a causa della presenza di brina e di ghiaccio.

Un altro studio danese a partire da dati registrati su 120 mesi tra il 1993 e il 2003 in un parco di 1.912 impianti mostra una probabilità di distruzione di 0,00083 impianti per anno. In ambito rurale, la correlazione di questa statistica (6×10^{-5} /anno) con la probabilità di occupazione di un m² di terreno da parte di una persona individua una probabilità globale di ferire qualcuno molto bassa.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	6

3 CENNI SUL FUNZIONAMENTO DI UN AEROGENERATORE

Le pale di un aerogeneratore sono fissate su un mozzo, e nell'insieme costituiscono il rotore. Vi è un sistema di controllo aerodinamico, chiamato imbardata, che permette il controllo della potenza durante la rotazione delle pale intorno al loro asse principale, modificando l'orientamento rispetto alla direzione del vento, per offrire allo stesso sempre il medesimo profilo alare garantendo, indipendentemente dalla direzione del vento, un verso orario di rotazione. Si riporta di seguito una figura esemplificativa che evidenzia il funzionamento del sistema meccanico dell'aerogeneratore e il verso di rotazione dell'aerogeneratore, in relazione alla direzione del vento.



Relazione tra direzione del vento e rotazione delle pale.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	7

Questa considerazione servirà per fissare in ogni momento il verso della velocità tangenziale, responsabile della gittata nel piano, rispetto a quello della velocità del vento, ortogonale alla velocità tangenziale e a sua volta responsabile della gittata fuori dal piano.

Dalla composizione delle due traiettorie si ottiene la traiettoria complessiva che individua la direzione del moto del corpo che si distacca. Mettendo in relazione tale traiettoria con la corografia del luogo si capisce se la pala nella percorrenza della sua traiettoria può rappresentare un elemento di pericolo per la strada e/o altro edificio interessato.



CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	8

4 AEROGENERATORE TIPO DI RIFERIMENTO

Le macchine di riferimento per il calcolo avranno le seguenti caratteristiche:

ROTORE

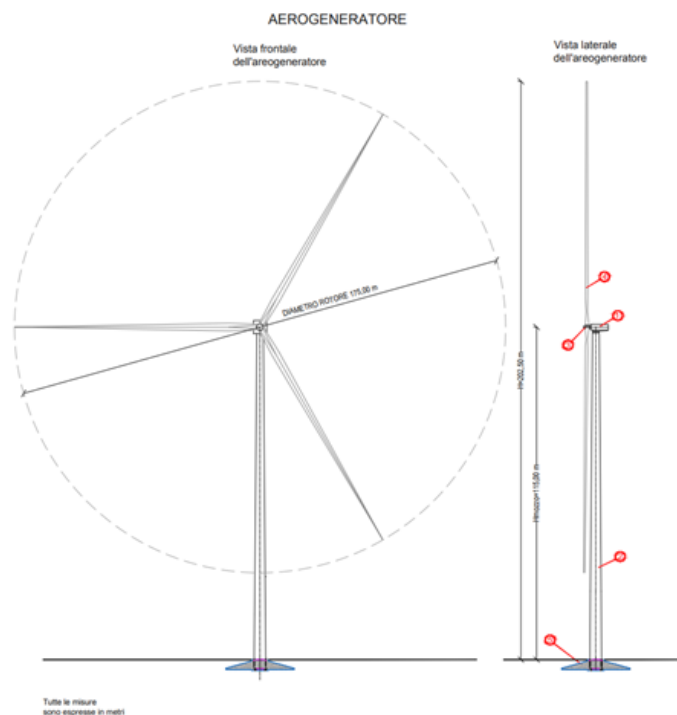
- diametro 175 m
- area spazzata 24.040 m²
- velocità di rotazione massima 12,1 rpm
- numero pale 3
- altezza mozzo 115 m

TORRE

- tipo: tubolare
- struttura: sezioni collegate tramite flangiatura
- altezza complessiva: 202,50 m

FUNZIONAMENTO

- cut-out: 25 m/s (velocità del rotore gradualmente ridotta)
- cut-in: 3 m/s
- Potenza: 7,20 MW



Schema tipo aerogeneratore avente altezza al mozzo pari a 115 m. e diametro rotore massimo di 175 m per un'altezza complessiva fino a 202,50 m

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	9

5 DESCRIZIONE DELL'AEROGENERATORE

L'aerogeneratore è una macchina che sfrutta l'energia cinetica posseduta del vento, per la produzione di energia elettrica, descritta nell'elaborato SDM-PD-R01-Relazione tecnica.

Sul mercato esistono diverse tipologie di aerogeneratori, ad asse orizzontale e verticale, con rotore mono, bi o tripala, posto sopra o sottovento. Il tipo di aerogeneratore previsto per l'impianto in oggetto è un aerogeneratore ad asse orizzontale con rotore tripala e una potenza massima di 7.200 KW, le cui caratteristiche principali sono di seguito riportate:

- rotore tripala a passo variabile, di diametro di 175 m, posto sopravvento al sostegno, in resina epossidica rinforzata con fibra di vetro, con mozzo rigido in acciaio;
- navicella in carpenteria metallica con carenatura in vetroresina e lamiera, in cui sono collocati il generatore elettrico e le apparecchiature idrauliche ed elettriche di comando e controllo;
- sostegno tubolare troncoconico in acciaio, avente altezza fino all'asse del rotore al pari a 115 m.

L'altezza complessiva dell'aerogeneratore è pari a 202,5 m.

I tronchi di torre sono realizzati da lastre in acciaio laminate, saldate per formare una struttura tubolare troncoconica.

Si tratta di aerogeneratori di ultima generazione, già impiegati estesamente in altri parchi italiani/UE, che consentono il miglior sfruttamento della risorsa vento e che presentano garanzie specifiche dal punto di vista della sicurezza.

La turbina viene di solito equipaggiata, in accordo alle disposizioni dell'ENAC (Ente Nazionale per l'Aviazione Civile), con un sistema di segnalazione diurna e notturna per la segnalazione aerea secondo normativa di sicurezza.

La segnalazione notturna di solito consiste nell'utilizzo di una luce rossa da installare sull'estradosso della navicella dell'aerogeneratore.

La segnalazione diurna consiste di solito nella verniciatura della parte estrema della pala con tre bande di colore rosso ciascuna di 6 m per un totale di 18 m.

La navicella è dotata di un sistema antincendio, che consiste di rilevatori di fumo e CO, i quali rivelano gli incendi e attivano un sistema 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 (cabine elettriche e trasformatore). In aggiunta a ciò, il rivestimento della navicella contiene materiali autoestinguenti.

L'aerogeneratore è dotato di un completo sistema antifulmine, in grado di proteggere da danni diretti ed indiretti sia alla struttura (interna ed esterna) che alle persone. Il fulmine viene "catturato" per mezzo di un sistema di conduttori integrati nelle pale del rotore, disposti ogni 5 metri per tutta la lunghezza della pala. Da questi, la corrente del fulmine è incanalata attraverso un sistema di

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	10

conduttori a bassa impedenza fino al sistema di messa a terra. La corrente di un eventuale fulmine è scaricata dal rotore e dalla navicella alla torre tramite collettori ad anelli e scaricatori di sovratensioni. La corrente del fulmine è infine scaricata a terra tramite un dispersore di terra. I dispositivi antifulmine previsti sono conformi agli standard della più elevata classe di protezione (Classe I), secondo lo standard internazionale IEC 61024-1.



CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	11

6 ROTTURA 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.

6.1 Fattori che influenzano la gittata

Da un punto di vista teorico, non prendendo in considerazione le caratteristiche aerodinamiche proprie della pala, la gittata maggiore della pala o della sezione di pala distaccata, si avrebbe nel caso di distacco in corrispondenza della posizione palare pari a 45 gradi e di moto a "giavelotto" del frammento. Nella realtà la pala ha una complessità aerodinamica tale per cui il verificarsi di un moto a giavelotto 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.

La traiettoria iniziale della pala/sezione-di-pala distaccata è determinata principalmente dall'angolo in corrispondenza del quale avviene il distacco e dall'azione esercitata dalle forze e dai momenti di inerzia. Per quanto riguarda le forze di tipo aerodinamico e relativi momenti, queste agiranno sulla pala/sezione-di-pala influenzando i movimenti rotatori in fase di volo.

Il tempo di volo generalmente è determinato:

- dalla componente verticale della velocità iniziale posseduta dalla pala/sezione di pala immediatamente dopo il distacco, in corrispondenza del suo punto baricentrico;
- dalla posizione rispetto al suolo;
- dall'accelerazione verticale;
- dalle forze di attrito agenti sulla pala/sezione di pala stessa.

Il tempo di volo che si deduce da tali considerazioni è utilizzato successivamente per il calcolo della distanza.

Distanza percorsa

La distanza orizzontale percorsa nella fase di volo è determinata:

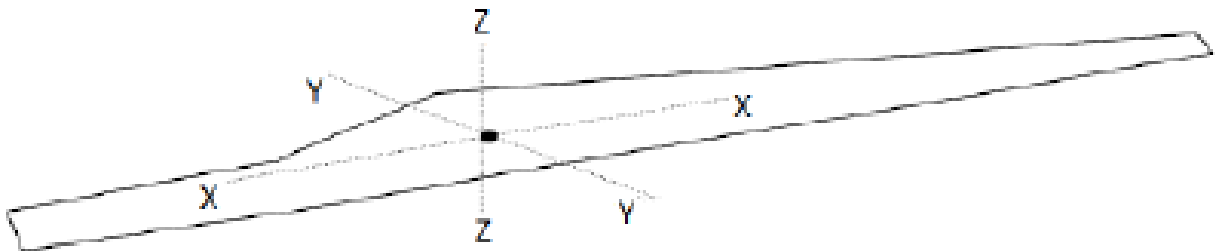
- dalla componente orizzontale della velocità immediatamente dopo il distacco;
- dalla velocità del vento nel momento del distacco;
- dalle forze di attrito che agiscono sulla pala/sezione-di-pala in volo;

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	12

- dal tempo di volo.

6.2 Moto rotazionale complesso

Il moto reale della parte distaccata risulta molto complesso, poiché dipendente, come detto, dalle caratteristiche aerodinamiche di questa e dalle condizioni iniziali (rollio, imbardata e beccheggio della pala). I casi puramente teorici di rottura e di volo con moto "a giavellotto" sono da ritenere, come accennato, poco realistici data la complessità aerodinamica della pala e la presenza dell'azione del vento. Il modello teorico che meglio caratterizza il moto delle parti (siano esse sezioni di pala e la pala intera) che hanno subito il distacco, e che più si avvicina al caso reale, è il modello "Complex Rotational Motion", che permette di studiare il moto nel suo complesso, considerando i moti di rotazione intorno agli assi xx , yy , zz .



La rotazione della pala intorno all'asse zz è causata dalla conservazione del momento della quantità di moto: in caso di rottura, per il principio di conservazione, il generico spezzone tende a ruotare intorno all'asse ortogonale al proprio piano. La rotazione intorno agli altri assi è dovuta alle azioni indotte dal vento incidente out of plane sulla pala/sezione di pala. In particolare, si genera:

- un momento intorno all'asse yy : centro di massa e centro aerodinamico della pala/sezione di pala non coincidono;
- un momento intorno all'asse xx : centro di massa della sezione di pala lungo la corda e il centro aerodinamico non coincidono.

La traiettoria iniziale è determinata principalmente dall'angolo di distacco/lancio e dalle forze inerziali agenti sulla pala/frammento di pala: al momento del distacco, oltre all'impulso, agiscono anche i momenti di flapwise, edgewise e pitchwise. Pertanto, il moto della parte distaccata sarà un moto rotazionale, su cui agisce anche la forza di gravità. La resistenza offerta dalla pala al moto sia *in plane* che *out plane* è generata dalla rotazione intorno agli assi xx e yy .

La massima gittata della pala/frammento di pala è strettamente dipendente:

- dal numero di giri del rotore e quindi dalla velocità periferica della parte al momento del distacco;
- dalla posizione della pala nel momento del distacco;
- dalla dimensione del frammento;

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	13

- dal peso del frammento (più leggero è, più il suo moto è limitato dalle forze di attrito viscoso);
- dal profilo aerodinamico della pala/frammento di pala.

Possiamo pertanto concludere che:

- se effettuiamo un calcolo che tenga conto dei valori cinematici e geometrici del moto senza considerare gli effetti viscosi e soprattutto la complessità del moto rotazionale otteniamo valori di gittata più alti di quelli reali (valore teorico > valore reale)
- più che dalle dimensioni dell'aerogeneratore e dell'altezza della torre, i valori della gittata dipendono dalla velocità di rotazione.

6.3 Rottura della pala alla radice

La rottura della pala alla radice è un evento che storicamente è risultato probabile (rispetto al numero di rotture totali) in quanto la sezione di attacco risulta assai "critica" dal punto di vista strutturale.

Le cause sono sostanzialmente due:

1. 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 possono creare problemi di affaticamento con conseguente rottura. C'è da dire che i costruttori hanno ben chiaro il problema e che negli ultimi anni si sono introdotti diversi accorgimenti che hanno migliorato di molto le prestazioni;
2. 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.

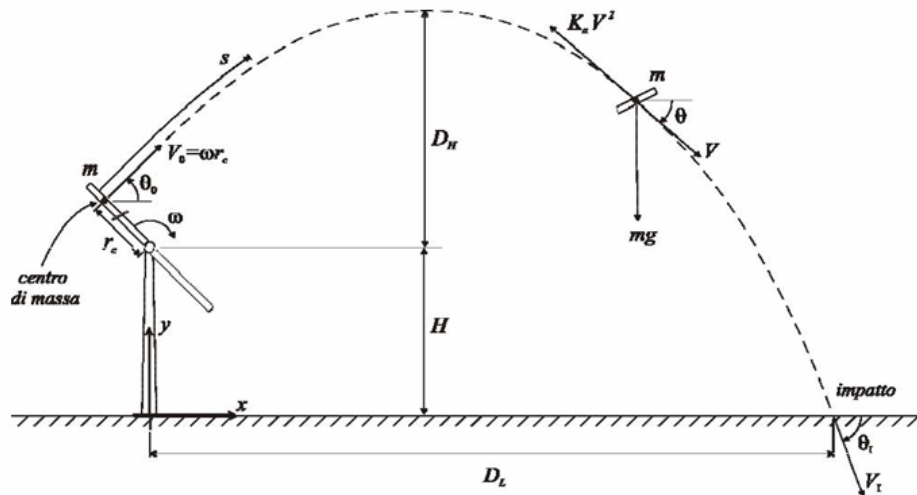
L'errata verifica del serraggio ed una plausibile riduzione del precarico possono determinare la rottura per fatica dei bulloni e di conseguenza il possibile distacco della pala.

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

- 1) distacco netto ed istantaneo di una intera pala alla sua radice;
- 2) baricentro posizionato ad 1/3 della lunghezza della pala;
- 3) 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%;
- 4) distacco in corrispondenza di un angolo di 60° rispetto all'orizzontale, che dal punto di vista teorico garantisce la massima gittata (moto in senso orario);

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	14

- 5) distacco alla rotazione di funzionamento massima;
- 6) vento presente durante tutto il volo della pala con velocità corrispondente alla velocità massima di funzionamento;
- 7) assenza di effetti di "portanza" del profilo alare.



Traiettoria della pala

Equazioni del moto applicate:

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

$$x'' = 0$$

$$y'' = -g$$

dove $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ è l'accelerazione di gravità.

La legge del moto, soluzione di queste equazioni è:

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

$$y(t) = y_0 + v_y t + 1/2 g t^2$$

dove $(x_0; y_0)$, è la posizione iniziale del punto materiale e $(v_x; v_y)$ è la sua velocità.

La velocità V_0 ha due componenti:

$$v_x = V_0 \cos \theta$$

$$v_y = V_0 \sin \theta$$

La traiettoria del punto materiale intercetta il suolo al tempo T tale che $Y(T)=0$; dalla legge del moto si ottiene

$$T = v_y / g + 1/g \sqrt{v_y^2 + 2y_0 g}$$

scartando la soluzione corrispondente a tempi negativi.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	15

Consideriamo il moto bidimensionale dell'elemento rotante, come il moto di un punto materiale concentrato nel baricentro, tenendo conto solo delle forze gravitazionali e supponendo trascurabile l'influenza dei vari agenti atmosferici, in particolare le forze di attrito dell'aria e quelle del vento. Chiamiamo con n il numero di giri al minuto primo compiuti dal corpo in movimento circolare. Tenuto conto che ad ogni giro l'angolo descritto dal corpo in movimento è pari a 2π radianti, per n giri avremo $2\pi n$ radianti/minuto, che è appunto la velocità angolare ω del corpo in movimento. Volendo esprimere la velocità angolare in radianti al secondo avremo:

$$\omega = 2\pi n / 60 \text{ rad/sec}$$

Date le caratteristiche geometriche della pala, e considerata la distribuzione dei pesi lungo il profilo della stessa, si ritiene con buona approssimazione che il baricentro sia posizionato ad un terzo rispetto alla lunghezza della pala, ad una distanza dal centro di rotazione pari a circa $r_g = 29,17$ m essendo il diametro del rotore $D = 175$ m ed il raggio di ciascuna pala $R = 87,50$ m circa.

Per determinare la velocità del baricentro della pala basta moltiplicare la distanza del baricentro dal centro di rotazione per la velocità angolare. Il numero di giri valutato per questa analisi è pari a 12,10 giri/minuto (massimo per il tipo di aerogeneratore di progetto).

Per questa velocità angolare, la velocità periferica del baricentro della pala risulta pari a:

$$V_g = \omega r_g = 2\pi n / 60 r_g = 36,94 \text{ m/sec}$$

Per tenere conto degli effetti attritivi dell'area, tale valore viene realisticamente ridotto in fase di calcolo di un'aliquota pari al 12%, pertanto la V_g di calcolo sarà pari a $V_g^* = 32,51$ m/s. La posizione e la velocità iniziale sono determinati, oltre che dalla velocità tangenziale appena calcolata, anche dall'angolo θ della pala al momento del distacco.

Essi sono legati alla posizione ed alla velocità iniziale dalle relazioni:

$$\begin{aligned} x_0 &= -r_g \cos(\vartheta); \\ y_0 &= H + r_g \sin(\vartheta); \\ v_x &= V_g \sin(\vartheta); \\ v_y &= V_g \cos(\vartheta). \end{aligned}$$

La gittata L è la distanza dalla torre del punto di impatto al suolo della pala; l'altezza H è l'altezza del mozzo della torre (115 m). Dalla legge del moto otteniamo:

$$L = X(t)$$

Sostituendo l'espressione ricavata per T , otteniamo la gittata L in termini di V_g e di ϑ :

Gittata max:

$$v_{x0} * (-v_{y0} * (v_{y0}^2 - 4(1/2H_g g)) / g$$

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	16

6.4 Determinazione gittata aerogeneratore $D=175$ m

L'applicazione delle formule sopra descritte ha portato alla determinazione del valore di gittata massima di seguito esposto.

Dati di input:

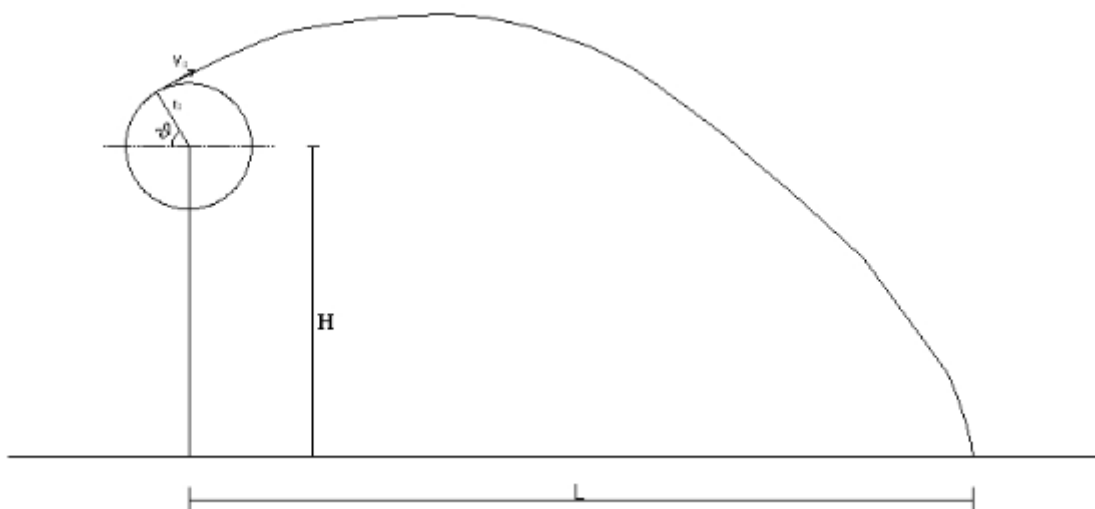
$$V_{g,calc} = 32,51 \text{ m/s};$$

$$r_g = 29,17 \text{ m};$$

$$g = 9.81 \text{ m/s}^2;$$

$$H = 115 \text{ m}.$$

Il valore della gittata dipenderà dall'angolo ϑ .



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

Come si evidenzia dal grafico e numericamente dalla tabella sotto riportata il valore massimo della gittata è pari a 204,24 m circa con un angolo di distacco di circa $\vartheta = \pi/3$ rad. e più precisamente pari a 60° . A tale valore dovrà aggiungersi la distanza del vertice della pala dal baricentro pari a 58,33 m e la posizione dell'ascissa del punto di distacco a partire dall'asse dell'aerogeneratore, per un valore complessivo della gittata: $L_{tot} = 277,20$ m.

La tabella seguente riporta per ciascun aerogeneratore la distanza del medesimo dagli immobili o dalle strade prossime.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	17

Aerogeneratore	Distanza immobili (civili abitazioni) [m]	Distanza da statale [m]	Distanza da provinciale [m]	Gittata [m]
R-SAL01	122,64	277,7	1000,61	277,2
R-SAL02	316,87	504,41	794,39	277,2
R-SAL04	416,5	427,71	621	277,2
R-SAL07	355,13	323,12	363,74	277,2
R-SAL09	813,86	555,77	642,93	277,2
R-SAL10	659,38	3336,6	957,57	277,2
R-SAL12	705,5	1153,85	917	277,2
R-SAL14	272,69	1153,85	1170,9	277,2
R-SAL16	513,19	>2000	747,56	277,2
R-SAL22	579,26	>2000	747,56	277,2
R-SAL29	1204,9	>2000	438,2	277,2
R-SAL30	783,95	>2000	712,87	277,2
R-TP01	1045,25	>2000	542,29	277,2
R-TP03	344,96	>2000	647,26	277,2
R-TP05	293,2	>2000	625,66	277,2
R-TP09	1773,72	>2000	737,64	277,2
R-TP11	2482,85	>2000	982,12	277,2
R-TP13	2821,1	>2000	731,29	277,2

Distanza aerogeneratori – Recettori limitrofi

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	18

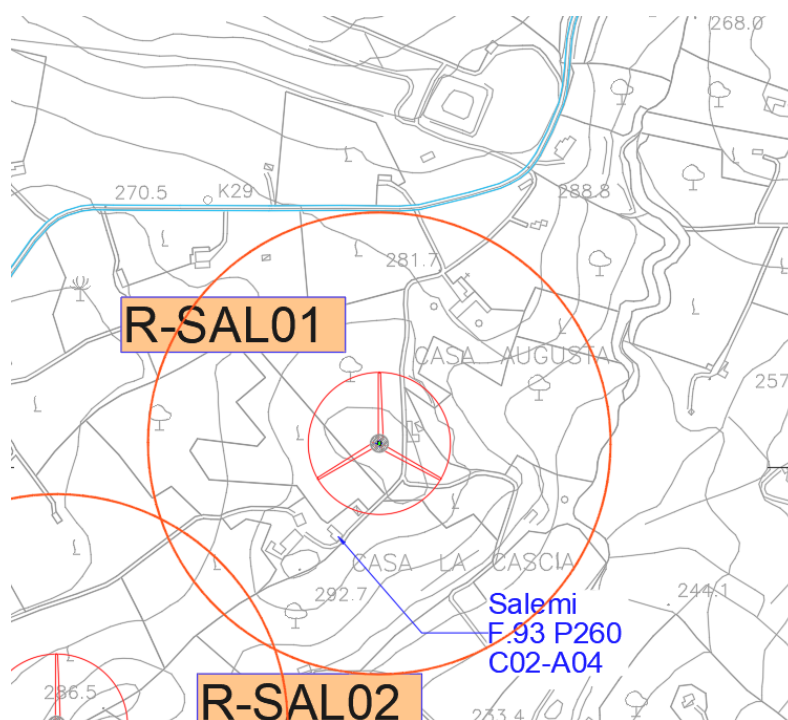
7 CONCLUSIONI

Partendo dai dati degli aerogeneratori in merito alla velocità di rotazione fornita dal costruttore (rpm) sono stati eseguiti dei calcoli di gittata con la teoria della fisica del punto materiale. Il calcolo illustrato nei paragrafi precedenti porta ad un valore massimo di gittata pari a 277,20 m.

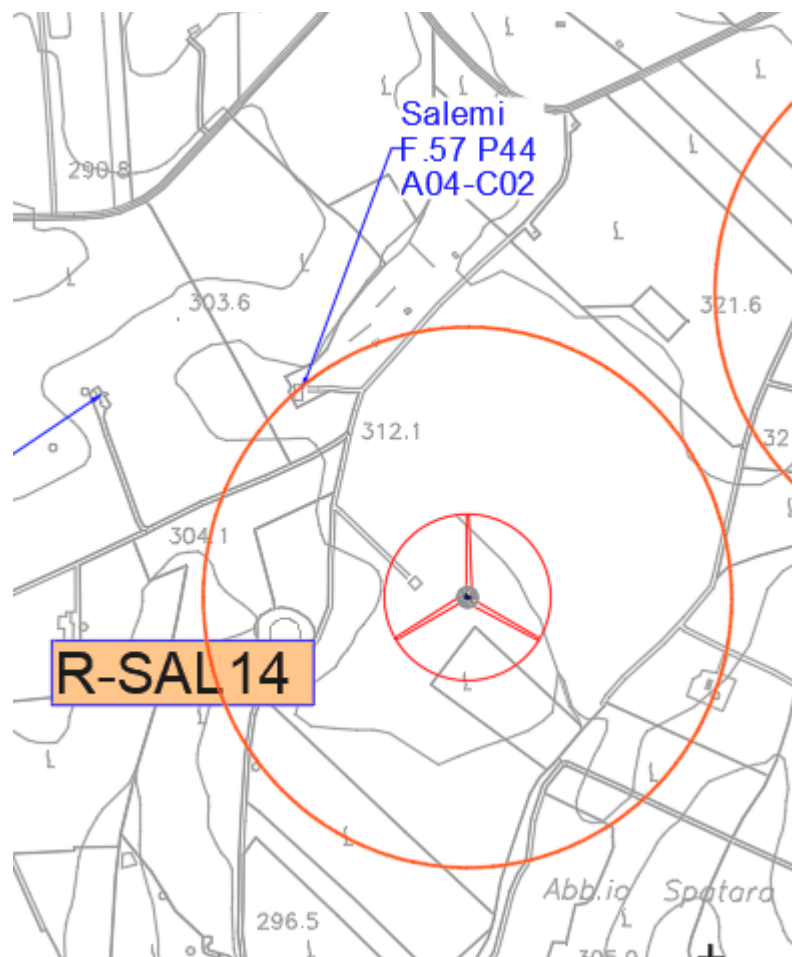
La gittata massima calcolata garantisce la distanza di sicurezza per le turbine tutte le turbine sia rispetto alle viabilità maggiormente prossime (Strade Provinciali e Strade Statali) sia riguardo agli edifici censiti catastalmente come civili abitazioni presenti nell'area di parco (vedasi Allegato 1 alla presente relazione specialistica).

L'unica eccezione è fatta per gli aerogeneratori R-SAL01 e R-SAL14; in questo caso specifico, si ha, rispettivamente, una distanza dagli edifici pari a 122,64 m e 272,69 m e pertanto inferiore al valore di gittata massima.

Le immagini che seguono mostrano in arancio i punti aventi distanza pari alla gittata rispetto alla torre. Si evidenzia come i manufatti in argomento ricadano all'interno di tale raggio.



CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	19

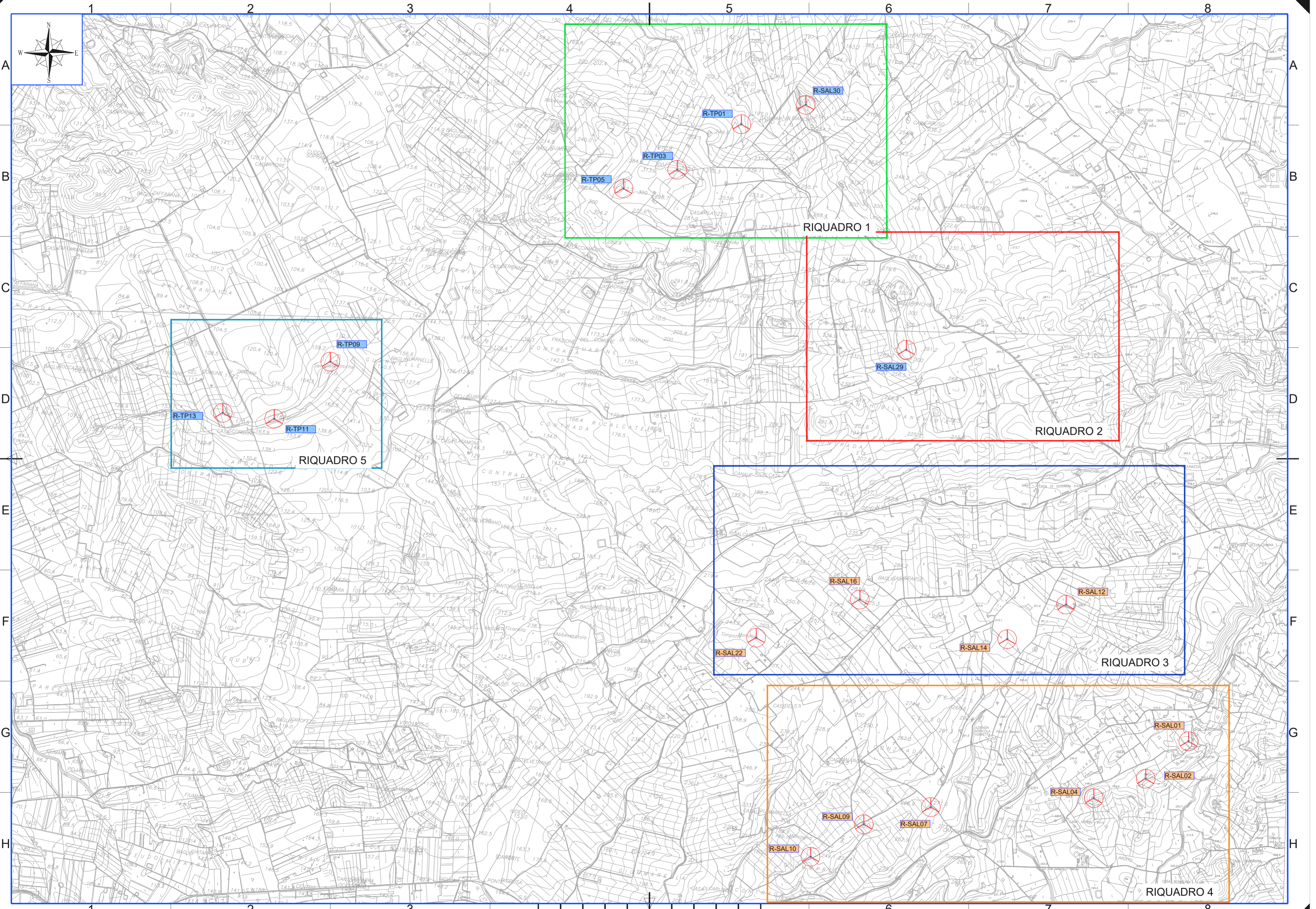


In questi casi specifici, qualora la direzione del vento prevista, coincida perfettamente con l'asse aerogeneratore – viabilità provinciale, si provvederà ad una limitazione del valore di rpm mediante telecontrollo, al fine di rendere sicuro l'esercizio della turbina stessa nei riguardi della gittata della pala eolica.

CODICE ELABORATO	OGGETTO DELL'ELABORATO	PAGINA
RST-SA-R0013_R0	INTEGRALE RICOSTRUZIONE PARCO EOLICO "SALEMI-TRAPANI" RELAZIONE GITTATA MASSIMA ELEMENTI ROTANTI	20

8 ALLEGATO 1 – INDIVIDUAZIONE GRAFICA DELLA GITTATA SU CTR





1

2

3

4

5

6

7

8

A

B

C

D

E

F

G

H

A

B

C

D

E

F

G

H

RIQUADRO 1

RIQUADRO 2

RIQUADRO 5

RIQUADRO 3

RIQUADRO 4

R-SAL30

R-TP01

R-TP03

R-TP05

R-SAL29

R-TP13

R-TP11

R-TP09

R-SAL16

R-SAL12

R-SAL22

R-SAL14

R-SAL01

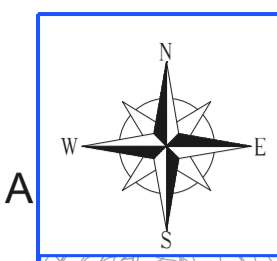
R-SAL02

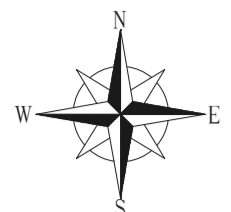
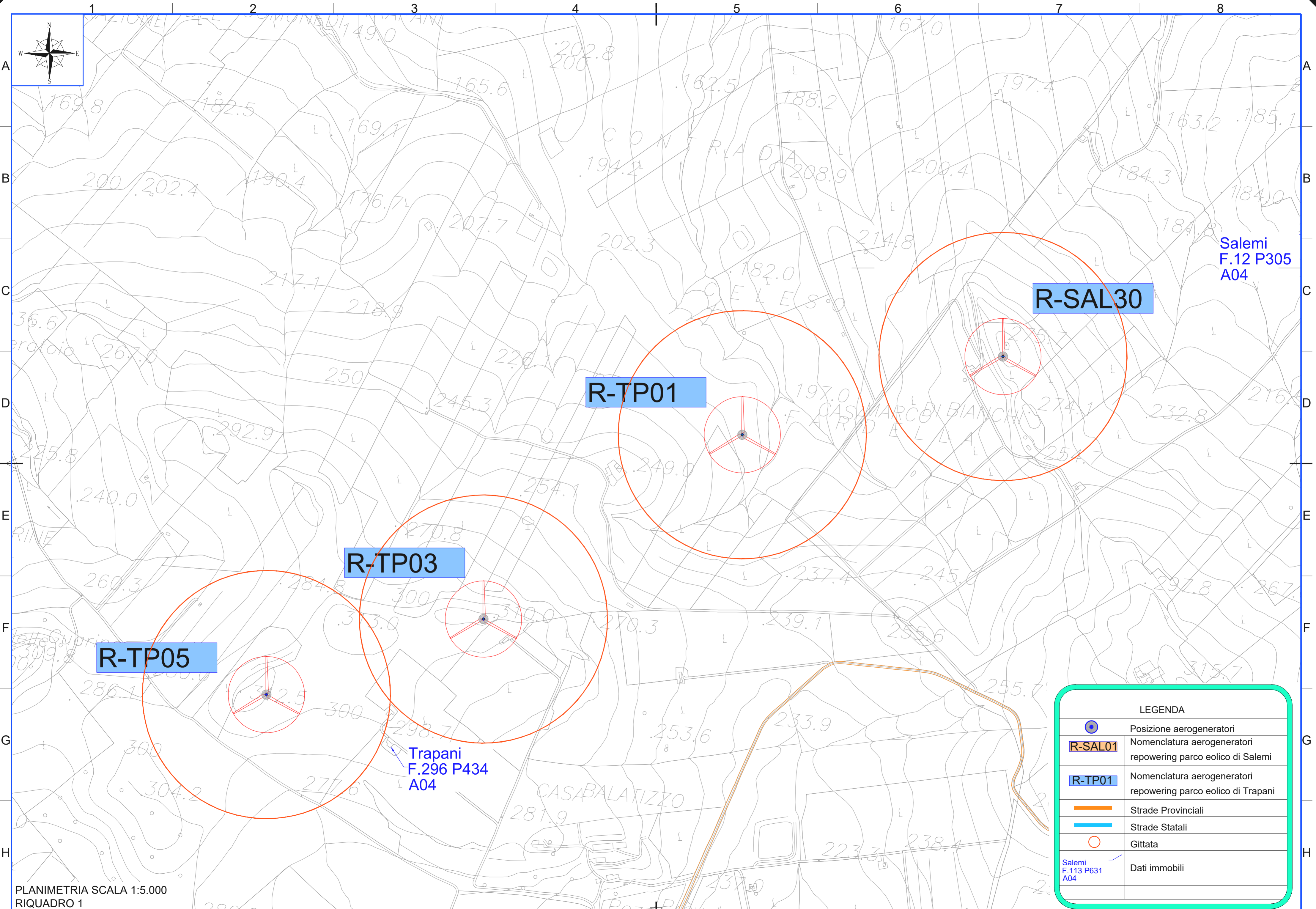
R-SAL04

R-SAL09

R-SAL07

R-SAL10





PLANIMETRIA SCALA 1:5.000
RIQUADRO 1

LEGENDA	
	Posizione aerogeneratori
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Salemi
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Trapani
	Strade Provinciali
	Strade Statali
	Gittata
	Dati immobili

Salemi
F.12 P305
A04

R-SAL30

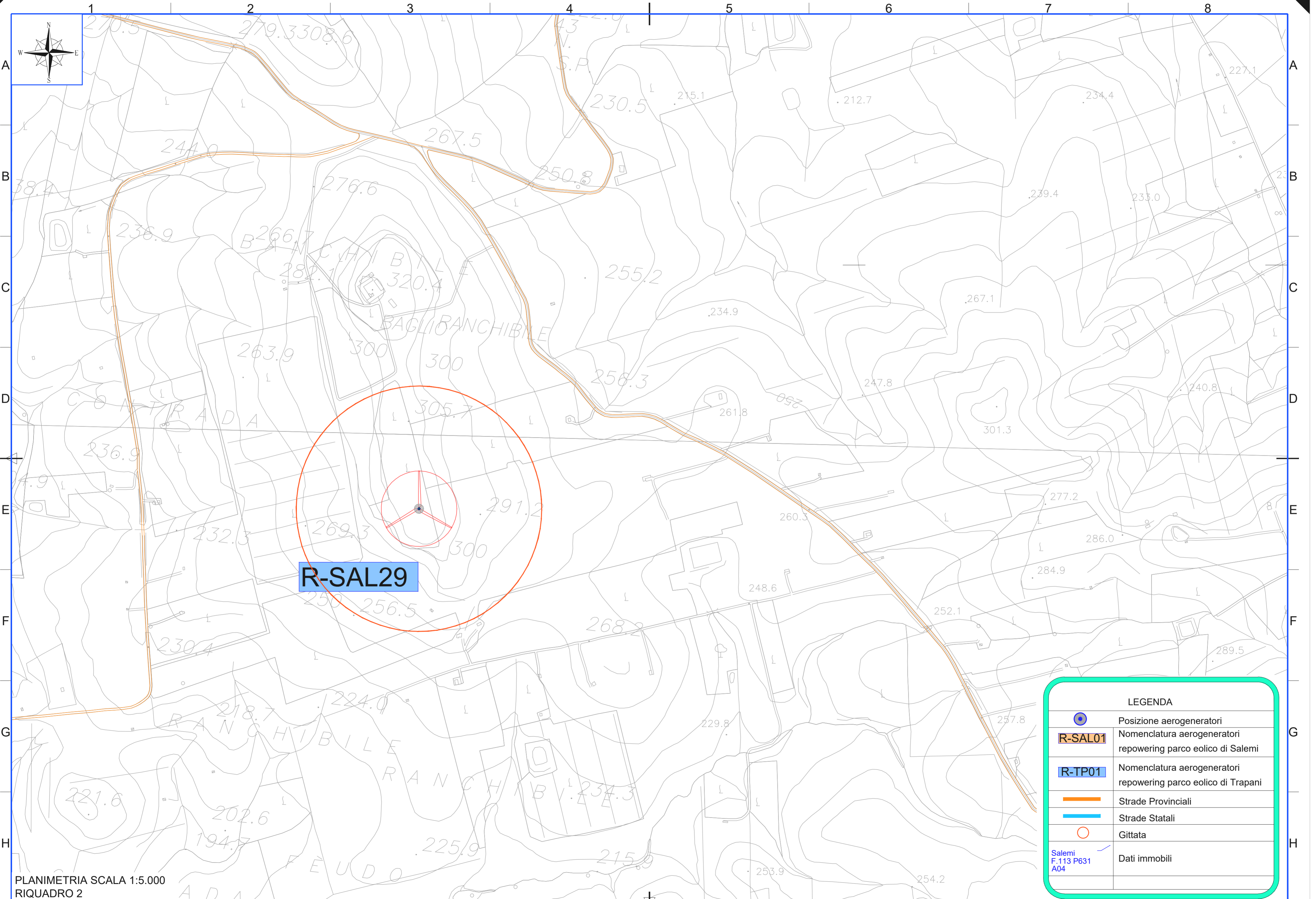
R-TP01

R-TP03

R-TP05

Trapani
F.296 P434
A04

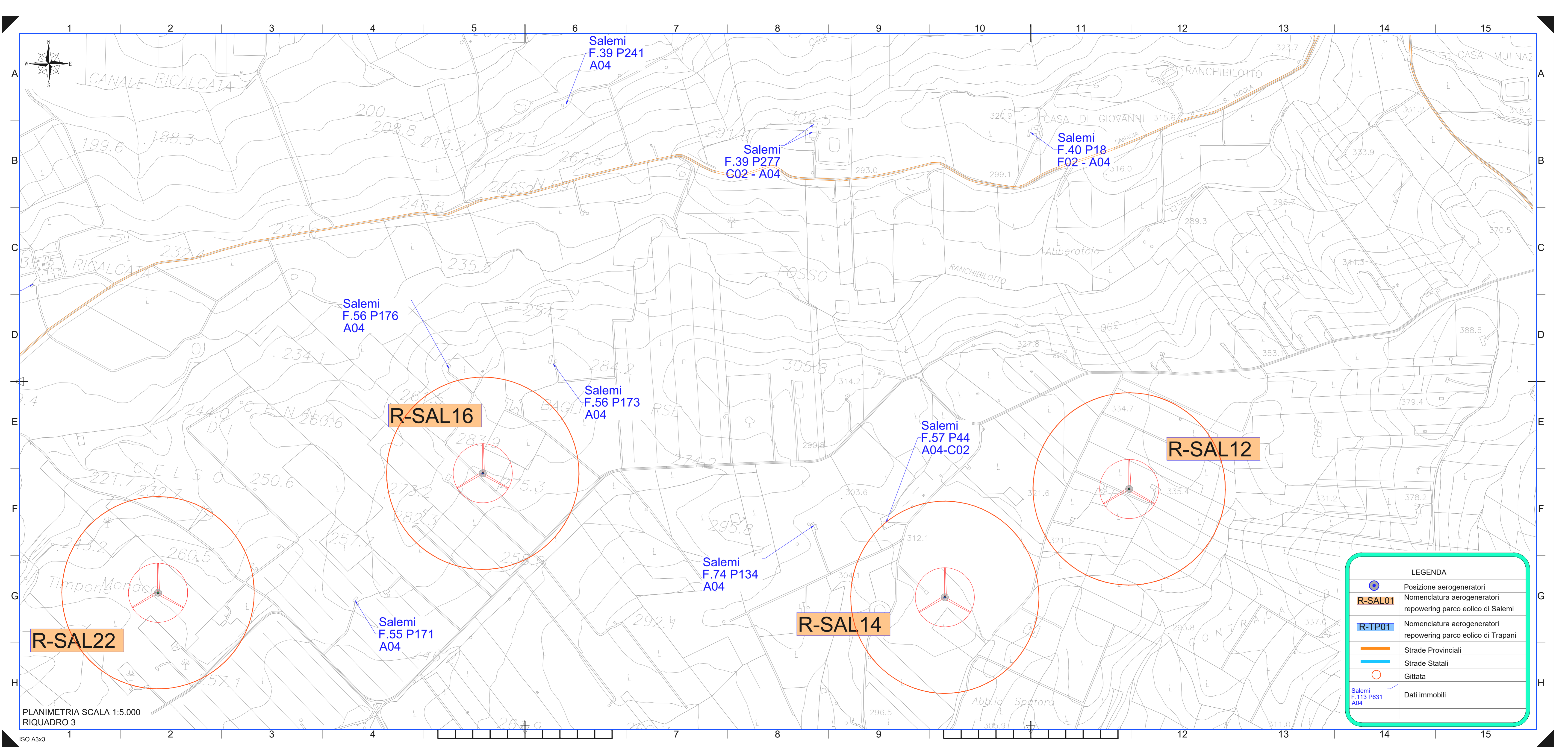
CASABALATIZZO



R-SAL29

LEGENDA	
	Posizione aerogeneratori
R-SAL01	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Salemi
R-TP01	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Trapani
	Strade Provinciali
	Strade Statali
	Gittata
	Dati immobili

PLANIMETRIA SCALA 1:5.000
RIQUADRO 2



PLANIMETRIA SCALA 1:5.000
RIQUADRO 3

LEGENDA	
	Posizione aerogeneratori
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Salemi
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Trapani
	Strade Provinciali
	Strade Statali
	Gittata
	Dati immobili

R-SAL22

R-SAL16

R-SAL14

R-SAL12

Salemi
F.39 P241
A04

Salemi
F.39 P277
C02 - A04

Salemi
F.40 P18
F02 - A04

Salemi
F.56 P176
A04

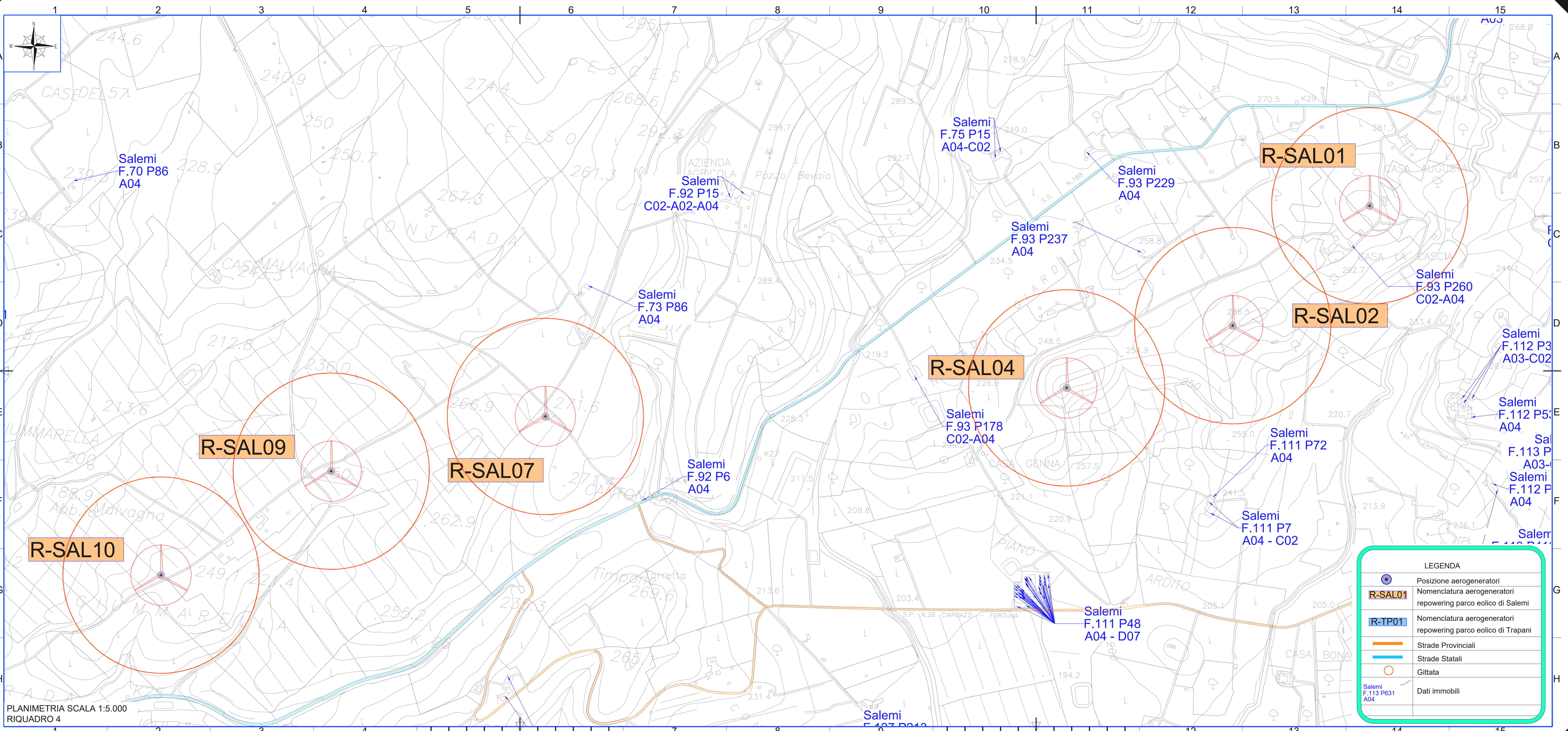
Salemi
F.56 P173
A04

Salemi
F.57 P44
A04-C02

Salemi
F.74 P134
A04

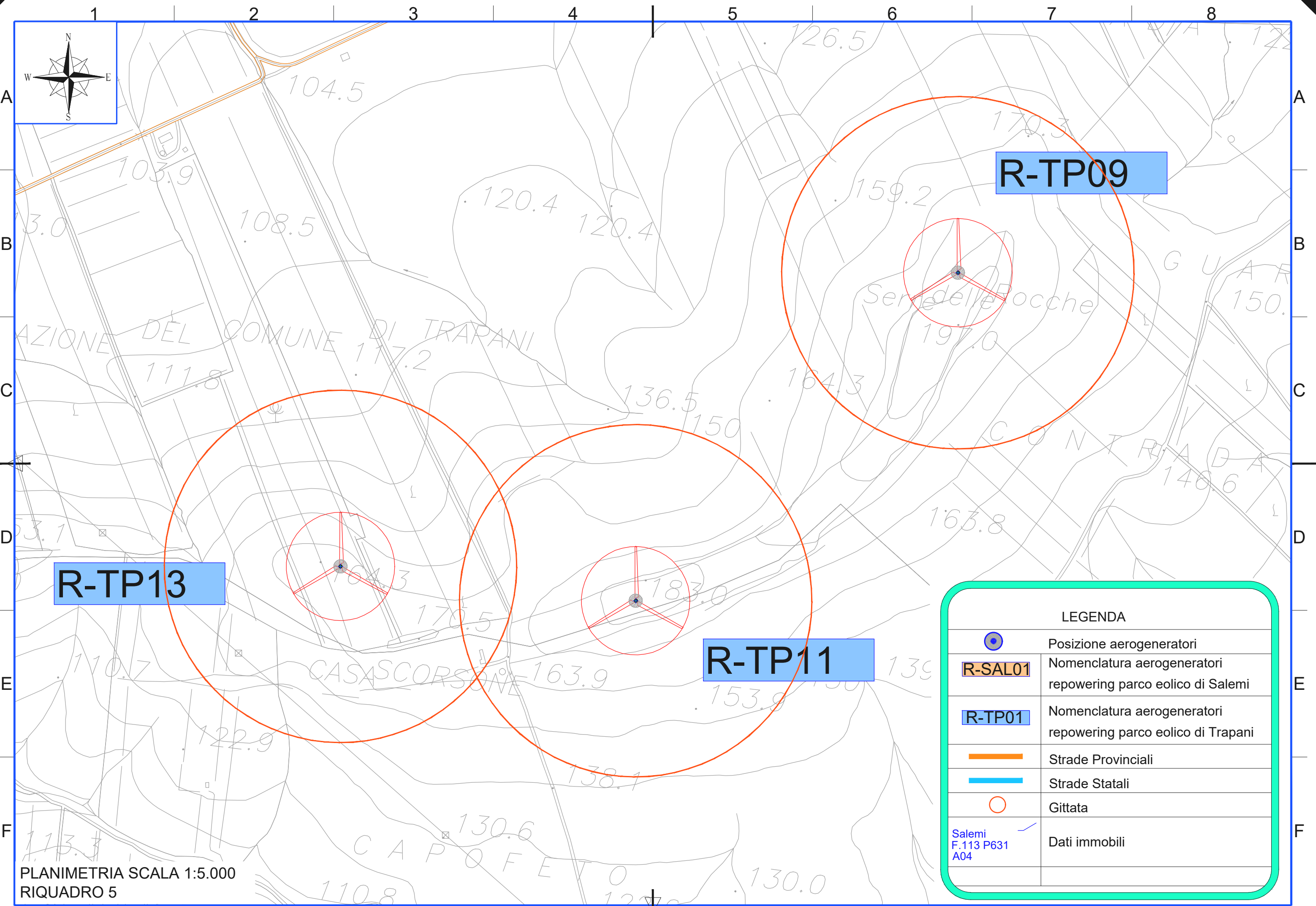
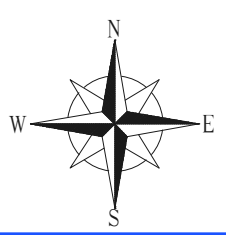
Salemi
F.55 P171
A04

Salemi
F.113 P631
A04



PLANIMETRIA SCALA 1:5.000
RIQUADRO 4

LEGENDA	
	Posizione aerogeneratori
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Salemi
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Trapani
	Strade Provinciali
	Strade Statali
	Gittata
	Dati immobili



R-TP13

R-TP09

R-TP11

LEGENDA	
	Posizione aerogeneratori
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Salemi
	Nomenclatura aerogeneratori repowering parco eolico di Trapani
	Strade Provinciali
	Strade Statali
	Gittata
	Dati immobili

PLANIMETRIA SCALA 1:5.000
RIQUADRO 5