

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI UDINE

CORSO DI DOTTORATO DI RICERCA IN TECNOLOGIE CHIMICHE ED
ENERGETICHE CICLO XXI

TESI DI DOTTORATO DI RICERCA

Caratterizzazione e conduzione di indagini
sperimentali sul funzionamento in siti antropizzati
di prototipi di aerogeneratori ad asse verticale

Anno Accademico 2009/2010

Relatore: ing. Maurizio Grigante

Dottorando: ing. Michele Rialti

PREMESSA

La presente ricerca tratta la tematica della generazione distribuita di energia prodotta attraverso l'utilizzo della risorsa eolica in ambienti antropizzati per mezzo di aerogeneratori di piccola taglia (alcuni kilowatt di potenza nominale) dotati di nuove tecnologie che ne consentono la connessione monofase alla rete elettrica di distribuzione in bassa tensione.

Lo studio dello stato dell'arte che è stato condotto nella fase iniziale ha individuato la tecnologia dei VAWT più adatta all'impiego in ambienti antropizzati; lo studio mostra che per tali prodotti non è ancora stata raggiunta la maturità tecnologica.

Per tale ragione la ricerca ha assunto un forte carattere sperimentale ed ha sviluppato due sotto tematiche principali: **lo studio in campo della risorsa eolica in ambienti antropizzati e la progettazione, realizzazione, collaudo e ottimizzazione di prototipi di aerogeneratori ad asse verticale** di piccola taglia.

Il supporto necessario per lo svolgimento di tali attività è stato offerto da una azienda del settore.

La ricerca ha caratterizzato il sistema **risorsa+macchina** ed ha assunto un carattere esplorativo per un nuovo filone di attività.

SOMMARIO

- ✓ **La generazione diffusa da FER: il mini eolico;**
- ✓ **Ricognizione sullo stato dell'arte di mini aerogeneratori ad asse verticale adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati;**
- ✓ **La risorsa eolica nell'ambiente antropizzato;**
- ✓ **Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate;**
- ✓ **Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori correlate all'analisi della risorsa eolica in aree urbanizzate;**
- ✓ **I mini aerogeneratori utilizzati per la conduzione delle indagini sperimentali;**
- ✓ **Campi di prova e sistemi di acquisizione impiegati;**
- ✓ **Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione;**
- ✓ **Problematiche riscontrate nell'impiego di mini aerogeneratori: esperienze generali a conclusione della ricerca.**

La generazione diffusa da FER: il mini eolico

Avere un impianto mini eolico non vuole dire essere dei produttori industriali di energia. Il concetto è quello di soddisfare il proprio fabbisogno di energia elettrica con una quota parte di energia autoprodotta in modo ecologicamente compatibile.

Tecnologia di interesse è il **mini eolico**, ovvero aerogeneratori con area spazzata fino a 200 mq. A questa classe di macchine fanno parte due principali famiglie di aerogeneratori: gli aerogeneratori con asse di rotazione del rotore orizzontale (HAWT) e ad asse verticale (VAWT).

La **risorsa eolica presente nelle aree antropizzate** è un bene prezioso, in quanto è possibile consumare direttamente sul posto l'energia prodotta evitando, oltre al consumo stesso di energia prodotta con il mix energetico nazionale che a tutt'oggi è per lo più costituito da fonti fossili, anche la componente di perdite dovuta al trasporto dell'energia stessa.



HAWT



VAWT

La generazione diffusa da FER: il mini eolico

Gli aerogeneratori così come i mini aerogeneratori, normalmente indicati come WECS (Wind Energy Conversion Systems), effettuano la conversione dell'energia cinetica del vento in lavoro elettrico.

La classificazione più utilizzata per gli aerogeneratori è quella che riguarda la taglia di potenza, in riferimento alla potenza nominale e considerando la non rigidità di tale suddivisione e la sua funzione puramente orientativa.

Sebbene non esiste un confine netto, è possibile affermare che gli aerogeneratori di media e grande taglia hanno tra di loro una certa affinità di soluzioni e di componenti adottati che sono usualmente impiegati per l'alimentazione di rete. Fino ad ora gli aerogeneratori di piccola taglia sono stati usati principalmente negli impianti isolati. In considerazione però del nuovo quadro normativo e delle nuove politiche volte allo sviluppo della generazione diffusa dell'energia, si sta diffondendo questa classe di aerogeneratori anche in connessione con la rete di distribuzione.

La taglia della macchina può anche essere riferita alle dimensioni della turbina con riferimento al diametro. Le due classificazioni apparentemente si sovrappongono, in quanto la potenza stessa è funzione del diametro della turbina, ma esistono aerogeneratori di uguale diametro ma potenza differente (quindi con un generatore diverso) progettati per venti di diversa intensità.

Vengono definite di piccola taglia quelle turbine eoliche la cui superficie spazzata dal vento non superi i 200m², cioè i 15.95m di diametro, e la cui tensione al punto di consegna non superi i 1000Vac o i 1500Vdc.

Da un punto di vista commerciale, invece, la definizione di taglia si basa esclusivamente su fattori come il diametro e la potenza installata.

Per questo motivo nasce un'ulteriore suddivisione delle turbine di piccola taglia puramente commerciale, ovvero **macchine micro (0- 5kWcirca) e macchine mini (5-80kW circa).**

La generazione diffusa da FER: l'ambiente antropizzato

Definizione di **ambiente antropizzato**:

quelle aree dove vi è la presenza di una rete di distribuzione BT e quindi di clienti finali di differenti tipologie. Tale definizione è da assumersi sotto il profilo energetico: ambienti antropizzati sono sia le zone abitate (aree urbane) che le aree ad uso industriale, artigianale o altro uso che sono state sede di interventi dell'uomo, in particolare volti alla posa della rete elettrica di distribuzione in bassa tensione (BT) che presuppone la presenza di utilizzatori finali.

Non è stata considerata la generazione diffusa di energia che prevede l'immissione in sistemi isolati o micro reti. Tali circostanze rappresentano anch'essi una classe di ambienti antropizzati e sono di enorme interesse sia per la comunità scientifica che per il mercato stesso.

Lo sfruttamento della risorsa eolica degli ambienti antropizzati presenta alcune peculiarità che possono costituire dei fattori determinanti allo sviluppo di questa tipologia di micro generazione distribuita. Ad oggi in nessun paese del mondo vi è una esperienza diffusa sul territorio di questa tecnologia di generazione, tuttavia in alcuni paesi ci sono segnali di sempre maggiore interesse manifestatisi attraverso il finanziamento di progetti pilota condotti da università e centri di ricerca in collaborazione con partner industriali. Gli ambienti antropizzati, come definiti sopra, offrono delle condizioni favorevoli alla diffusione dei micro aerogeneratori, che possono essere così riassunte:

- **coincidenza del punto di immissione e di prelievo dell'energia elettrica presso le utenze;**
- **eliminazione del problema dell'accumulo dell'energia grazie all'immissione in rete del lavoro prodotto;**
- **elevate altezze di installazione, raggiungibili grazie al posizionamento dei micro aerogeneratori sul tetto degli edifici, che consentono di catturare una maggiore risorsa eolica;**
- **ridotto impatto sull'ambiente circostante;**

La generazione diffusa da FER: l'ambiente antropizzato

Per contro, vi sono alcuni aspetti critici che l'ambiente antropizzato fa emergere e che rappresentano altrettante tematiche di interesse per i ricercatori del settore:

- **percezione della sicurezza della macchina;**
- **emissioni sonore;**
- **vibrazioni indotte sulla struttura ospitante;**
- **tecnologie di ancoraggio a terra o sulla copertura di edifici.**

Concetto di percezione della sicurezza: pone un serio vincolo in quanto le dimensioni intrinseche del rotore obbligano ad adottare alte velocità di rotazione del rotore, mediamente superiori ai 200 rpm ma che tuttavia in alcuni modelli raddoppiano. La percezione del rischio varia non solo in funzione del soggetto, ma soprattutto in funzione delle caratteristiche dimensionali dell'aerogeneratore ed è non lineare in funzione della velocità di rotazione. Per il prototipo sviluppato nel corso del presente lavoro si è condotta una piccola indagine e si è valutata questa soglia attorno al valore di 340 rpm.

Ricognizione sullo stato dell'arte di VAWT adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati

L'industria moderna degli aerogeneratori di piccola taglia **nacque agli inizi degli anni '60**, come primo tentativo di risposta alla crisi energetica di allora. Furono in parte **ripresi vecchi concetti progettuali sviluppati già negli anni '30**, ma subito si svilupparono nuove linee di prodotto con caratteristiche innovative. La principale applicazione per i piccoli aerogeneratori fu, in questo periodo e **fino al 1983, la connessione alla rete elettrica**, in quanto fortemente incentivata da specifiche politiche fiscali ("tax credit") e contributi a fondo perduto, oltre che dall'elevato costo energetico.

In parallelo cominciarono a svilupparsi aerogeneratori per applicazioni **off-grid, sia per il mercato americano** che per i Paesi in via di sviluppo.

Terminata l'emergenza, e spariti gli incentivi, il mercato dei mini aerogeneratori **evolve decisamente verso le applicazioni stand-alone e off-grid**, sia negli Stati Uniti che nei Paesi scarsamente elettrificati.

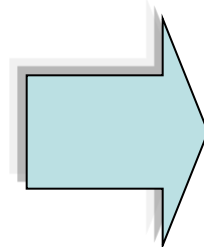
Negli ultimi anni si è osservato, a livello mondiale, un ritorno di interesse da parte di nuove imprese verso lo sviluppo di progetti di VAWT di taglia di potenza ridotta: rispetto alle iniziative passate, ora si possono utilizzare le tecnologie sviluppate ad hoc dall'industria dell'eolico legata alla tecnologia dell'asse orizzontale che, nel frattempo, ha compiuto passi da gigante.

L'indagine, condotta nel 2006 ha messo in luce che:

Nessuna delle aziende contattata è stata disponibile alla fornitura del prodotto richiesto.

Per tale ragione si è stato deciso di procedere con la prova in campo unicamente dell'aerogeneratore sviluppato nell'ambito del progetto di ricerca.

Ricognizione sullo stato dell'arte di VAWT adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati



Il VAWT Quietrevolution (5kW) con pale svergolate è stato preso come riferimento dal punto di vista tecnologico.

La VAWT EOLE (H=110m D= 64m C=2.2m) di potenza pari a 4 MW (1988 - 2003).

Ricognizione sullo stato dell'arte di VAWT adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati

Peculiarità dei gruppi costituenti un VAWT adatto all'utilizzo in ambienti antropizzati:

▪ Rotore

Profilo pale, materiali, forma

H/D, albero, razze

$$S = \frac{N \cdot c}{D} \quad \lambda = \frac{\omega \cdot r}{V_0}$$

▪ Trasmissione meccanica

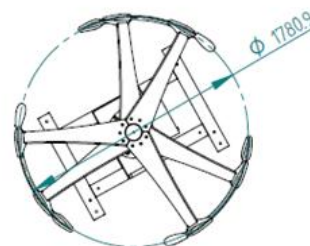
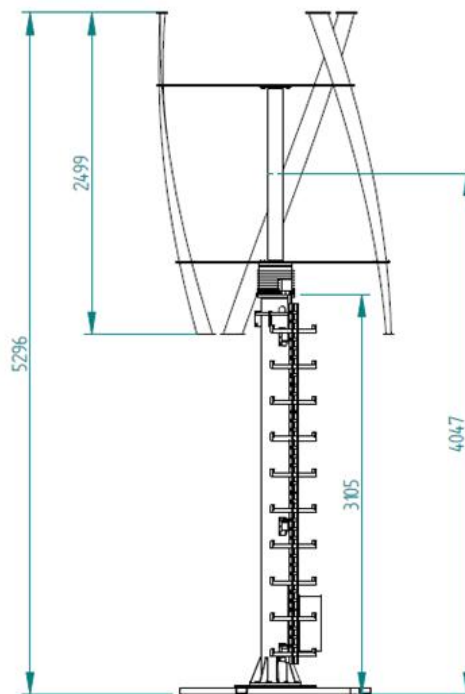
Moltiplicatore di giri

Integrazione asse di rotazione/statore-rotore

▪ Generatore

Multipolari, relazione coppia-rpm

Motore-generatore

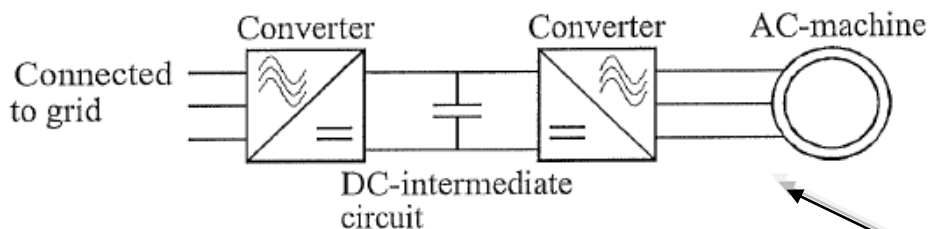


Ricognizione sullo stato dell'arte di VAWT adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati

Ricerca dei gruppi costituenti un VAWT adatto all'utilizzo in ambienti antropizzati:

▪ Sistema di conversione

Il funzionamento delle turbine a numero di giri variabile comporta la necessità di connettere un generatore AC a velocità variabile ad una rete elettrica con frequenza fissa; a tale scopo è necessario avere interposta dell'elettronica che possa condizionare la potenza in transito.



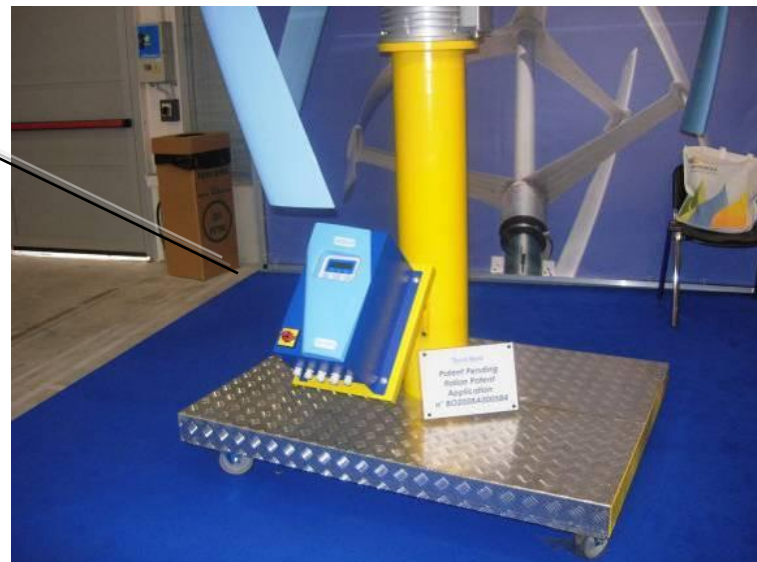
▪ Sistema di controllo

Aerodinamico/Elettrico-Elettronico

Acquisizione segnali/diagnostica

▪ Sistema di emergenza indipendente

Resistenze di frenatura, corto circuito generatore



Ricognizione sullo stato dell'arte di VAWT adatti all'utilizzo in ambienti antropizzati

Ricerca dei gruppi costituenti un VAWT adatto all'utilizzo in ambienti antropizzati:

▪Struttura di sostegno

La struttura di sostegno deve sostenere il peso del rotore e del generatore, la spinta che il vento genera sul rotore e sulla struttura stessa e sopportare le sollecitazioni (flettenti e torcenti) trasmesse dalla macchina operatrice alla struttura di sostegno.

Le strutture di sostegno per aerogeneratori ad asse verticale possono avere altezze, dimensioni e caratteristiche differenti in base alla loro installazione:

- in campo aperto su torri di altezza elevata ancorate al terreno per mezzo di plinti di fondazione;
- su sommità di edifici su torri di altezza ridotta ancorate al piano di calpestio per mezzo di tasselli o a gravità.

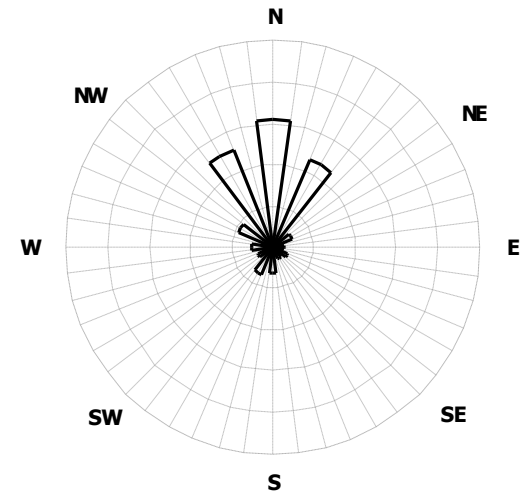
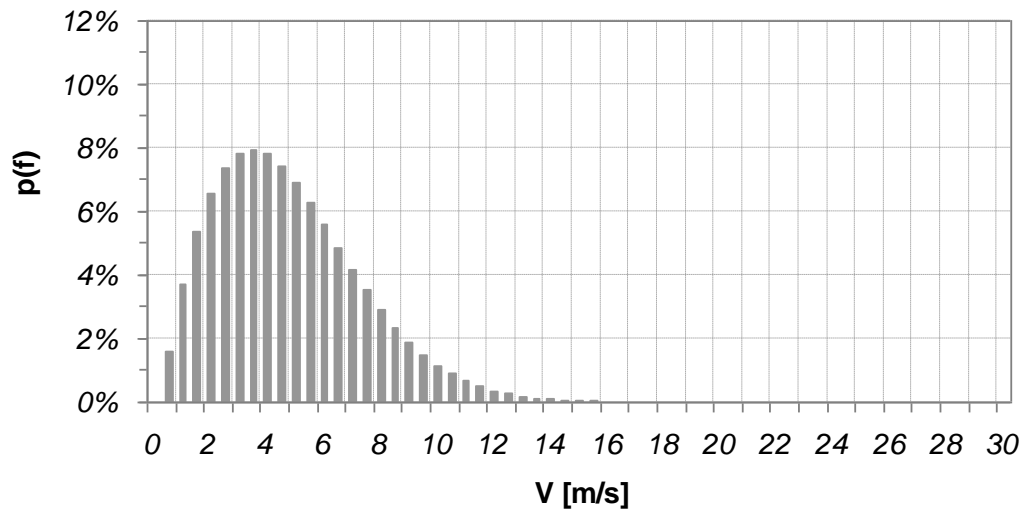
Per gli aerogeneratori installati sulla sommità degli edifici l'altezza della torre è ridotta al fine sia di sfruttare l'accelerazione del vento indotta dall'edificio sia per ragioni di carattere pratico dovute alle difficoltà che si incontrano nel portare su coperture di edifici già esistenti materiali ingombranti e pesanti per la cui installazione tali coperture non sono state progettate.

Al tempo stesso, sugli edifici con terrazza di sommità, l'altezza minima della torre deve permettere di uscire dalla scia turbolenta.

La risorsa eolica nell'ambiente antropizzato

Valutazione della risorsa eolica: caratterizzazione della risorsa eolica in aree antropizzate finalizzata alla creazione di un concept dedicato di aerogeneratore

▪ **representazione statistica;**



$$p(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{V}{c}\right)^k\right]$$

$$V_m = \frac{\sum V_i}{N_{\text{eventi}}}$$

$$\sigma_r = \left[\sum (V_i - V_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$V_{m3} = \left(\frac{1}{N} \sum V_i^3 \right)^{\frac{1}{3}}$$

$$I = \frac{\sigma_r}{V_m} = \frac{\left[\sum (V_i - V_m)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}{V_m}$$

La risorsa eolica nell'ambiente antropizzato

Valutazione della risorsa eolica: caratterizzazione della risorsa eolica in aree antropizzate finalizzata alla creazione di un **concept dedicato di aerogeneratore**

- **profili verticali della velocità del vento;**

$$U(z) = u(z_{rif}) \cdot \left(\frac{z}{z_{rif}} \right)^m$$

$$m = 1 - 0,55 \cdot \log_{10}(v_{rif}) \cdot \left(\frac{z_0}{z_{rif}} \right)^{0,2}$$

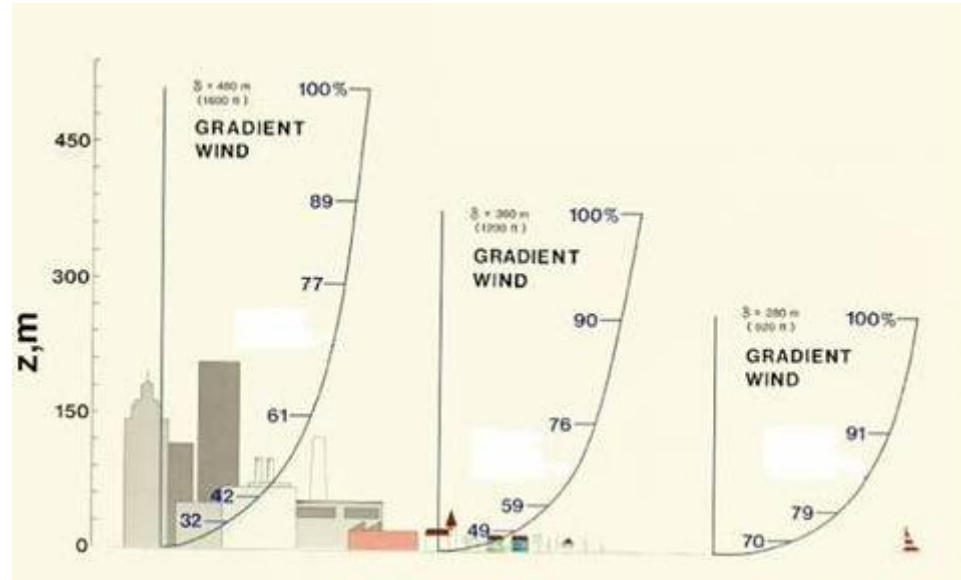
- **effetti locali**

L'ambiente caratterizzato da attività antropica differisce in modo significativo da quello rurale, in primo luogo perché l'altezza degli edifici condiziona in maniera pesante il parametro z_0 , che sarà in questo caso determinato dall'altezza media degli edifici H .

La scala temporale τ_{turb} sarà determinata dal rapporto tra la dimensione caratteristica delle strutture turbolente H e la velocità media del vento v .



Il tempo necessario per la formazione di un tubo di flusso quasi-stazionario è caratterizzato da τ_t

$$\tau_{turb} = \frac{H}{v} \quad \tau_t = \frac{6D}{v} \quad \tau_{turb} > \tau_t \quad \Rightarrow \quad D < \frac{H}{6} \quad \text{Condizione per il funzionamento in regime quasi stazionario su edifici}$$






Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

	<p>Codice Stazione: 01 Provincia di installazione: TN Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 5,5m, 2,5m Tipologia di sensori di velocità: a coppe, sonico 3D Installatore: MR, AN Data di avvio acquisizione:</p>
	<p>Codice Stazione: 02 Provincia di installazione: RM Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 3,5m Tipologia di sensori di velocità: a coppe Installatore: MR, EL, FM Data di avvio acquisizione: 10/11/2009</p>
	<p>Codice Stazione: 03 Provincia di installazione: ME Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 5,5m Tipologia di sensori di velocità: a coppe Installatore: MR, IB Data di avvio acquisizione: 14/09/2009</p>

	<p>Codice Stazione: 04 Provincia di installazione: TN Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 3m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: DICA UNITN Data di avvio acquisizione: 28/06/2002</p>
	<p>Codice Stazione: 05 Provincia di installazione: TN Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 4m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: MR, EL Data di avvio acquisizione: 16/10/2009</p>
	<p>Codice Stazione: 06 Provincia di installazione: RA Tipologia di installazione: sommità edificio Altezze di misura dal piano di calpestio: 3,5m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: MR, EL Data di avvio acquisizione: 24/11/2009</p>

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

	<p>Codice Stazione: 07 Provincia di installazione: TN Tipologia di installazione: campo aperto Altezze di misura al suolo: 15m, 12m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: MR, AN Data di avvio acquisizione: 29/11/2007</p>
	<p>Codice Stazione: 08 Provincia di installazione: RA Tipologia di installazione: campo aperto Altezze di misura al suolo: 15m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: MR, EL Data di avvio acquisizione: 29/10/2009</p>
	<p>Codice Stazione: 09 Provincia di installazione: TN Tipologia di installazione: campo aperto Altezze di misura al suolo: 36m Tipologia di sensori di velocità: coppe Installatore: MR Data di avvio acquisizione: 11/08/2008</p>

ELENCO DELLE STAZIONI DI MISURA APPRONTATE:

Sommità di edifici in ambiente urbano:

- Trento (TN) - zona industriale Spini di Gardolo – **cod. 01**
- Roma (RM) – zona Tiburtina – **cod. 02**
- Messina (ME) – CNR-ITAE – **cod. 03**
- Trento (TN) – Centro storico – **cod. 04**
- Torbole sul Garda (TN) – Lungolago – **cod. 05**

Sommità di edifici in campo aperto:

- Marina Romea (RA) – Bagno Sole e Luna – **cod. 06**

Su torre anemometrica al suolo in ambiente urbano:

- Trento (TN) - Zona industriale Spini di Gardolo – **cod. 07**
- Marina di Ravenna (RA) – Diga foranea – **cod. 08**

Su torre anemometrica al suolo in campo aperto:

- Trento (TN) - Stazione di Monte impianti di risalita – **cod. 09**

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Metodologia di acquisizione:

I dati anemometrici sono stati acquisiti in periodi temporali diversi ed attraverso stazioni di misura con caratteristiche differenti.

Il tempo impostato per il campionamento delle misure ed il periodo di acquisizione è tra i 32 Hz con acquisizione ogni 10s e 0,5 Hz con acquisizione ogni 10 min.

Il dato registrato ogni 10 minuti è lo standard delle misurazioni nel settore dell'energia eolica ai fini della valutazione della risorsa energetica disponibile; si è ritenuto di forzare le misure a periodi di acquisizione di 10s al fine di integrare il monitoraggio della risorsa eolica con dati di funzionamento di prototipi di aerogeneratori, come viene illustrato nei capitoli successivi.

Per l'acquisizione si è ricorsi all'utilizzo di tecnologie di acquisizione consolidate a bassa frequenza di campionamento ($> 0,5$ Hz), i classici data logger. Sono state escluse le più performanti schede di acquisizione in quanto nella maggior parte dei siti di misura non vi è né rete elettrica né rete dati e le gravose condizioni ambientali dell'ambiente di lavoro non consentirebbero una buona disponibilità di dati acquisiti.

La misura dell'intensità del vento è stata fatta per mezzo di anemometri a coppe di tipo calibrato per tutte le stazioni.

La misura della direzione del vento è stata effettuata per mezzo di sensori di direzione (banderuole).

In uno dei siti di misura è stato possibile installare un anemometro sonico 3D in aggiunta agli anemometri a coppe utilizzati in tutte le altre stazioni. Tale particolare configurazione ha permesso di effettuare uno **studio delle componenti verticali di vento presenti sulla sommità di edifici**.

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Metodologia di analisi:

Una volta entrati in possesso dei dati grezzi di vento, essi sono stati processati sia attraverso programmi di calcolo commerciali in uso nel settore dell'energia eolica che attraverso codici numerici proprietari scritti in linguaggio MATLAB®.

Il dato grezzo prima di tutto è stato **archiviato, poi transcodificato e infine validato**.

La validazione ha prodotto insiemi omogenei di dati che, una volta elaborati, hanno permesso di ottenere:

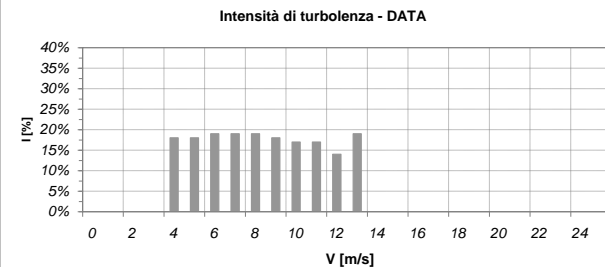
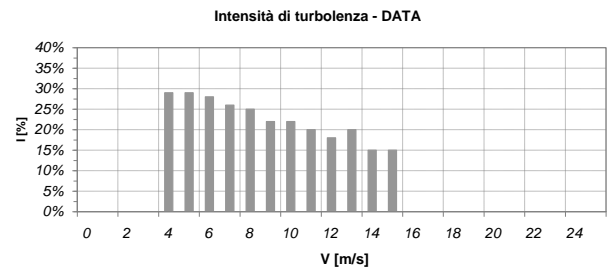
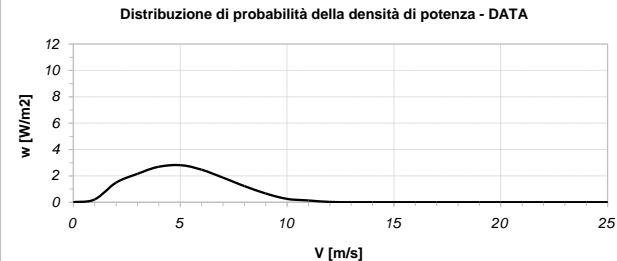
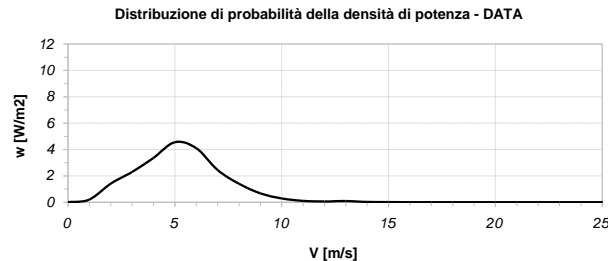
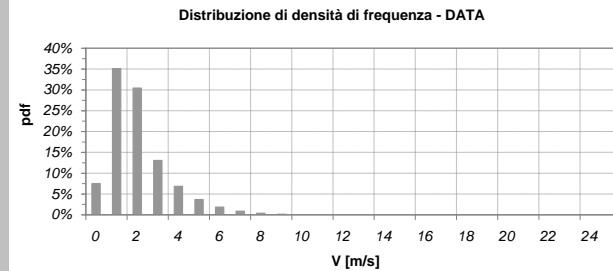
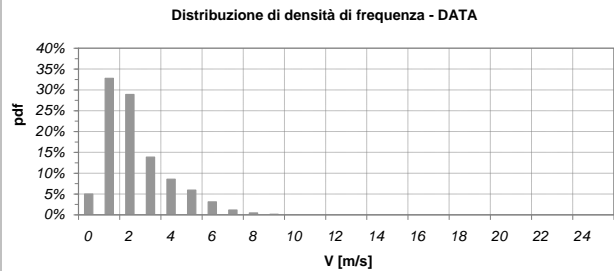
- distribuzione di velocità;
- deviazione standard, coefficiente di irregolarità e intensità di turbolenza;
- velocità massime;
- stima dell'energia disponibile e relativa distribuzione per classi di velocità;
- distribuzione orizzontale della direzione del vento (rosa dei venti);
- stima dell'energia disponibile e relativa distribuzione per settori;
- distribuzione dei parametri di velocità del vento per settori;
- distribuzione di velocità del vento per classi di velocità e per settori;
- distribuzione oraria della velocità del vento su base annua;
- elaborazioni mensili.

I regimi di vento sono stati caratterizzati dal parametro di forma k e dal parametro di forma c .

L'analisi è stata eseguita assumendo le condizioni climatiche dell'atmosfera standard pari a $1,225 \text{ kg/m}^3$.

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Elaborazioni statistiche: confronto tempi di acquisizione 1 min (dx) e 10 min (sin) per la medesima stazione.



Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

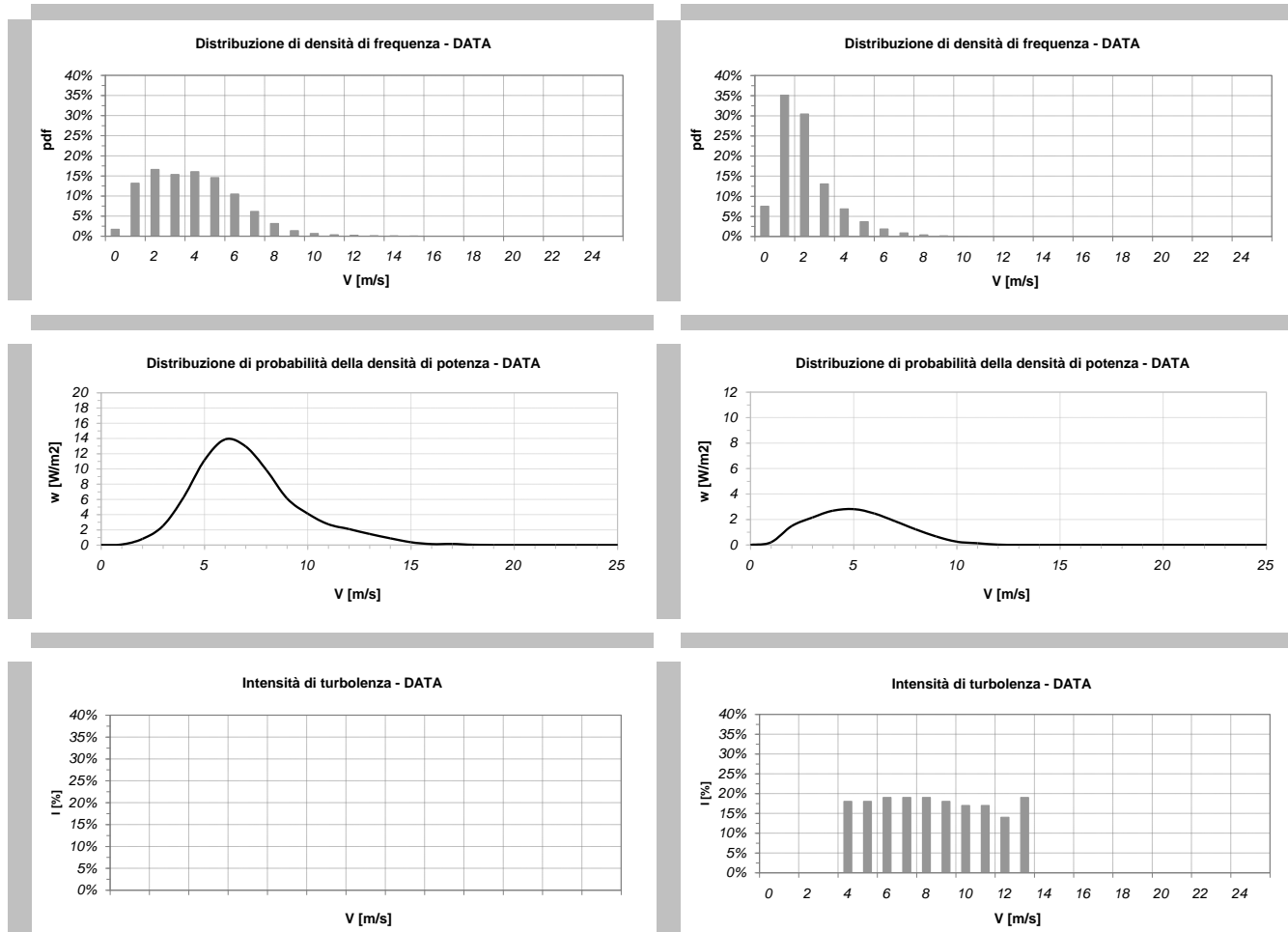
Elaborazioni statistiche: confronto tempi di acquisizione 1 min (dx) e 10 min (sin) per la medesima stazione.

Settore	Parametro A [m/s]	Parametro k [-]	Frequenza [%]	Velocità media [m/s]	Risorsa [W/m ²]	Turbolenza [%]
Media	2.59	1.51	100.00	2.33	21.02	0.28
N	2.67	1.63	46.13	2.39	9.31	0.22
NE	2.20	1.34	13.55	2.02	2.20	0.32
E	1.53	1.09	2.98	1.48	0.29	0.36
SE	1.99	1.29	5.04	1.84	0.67	0.36
S	2.09	1.60	7.44	1.87	0.74	0.40
SW	2.29	1.75	8.85	2.04	1.02	0.39
W	3.95	1.97	6.36	3.50	3.25	0.33
NW	3.23	1.61	9.67	2.90	3.55	0.29

Settore	Parametro A [m/s]	Parametro k [-]	Frequenza [%]	Velocità media [m/s]	Risorsa [W/m ²]	Turbolenza [%]
Media	2.37	1.52	100.00	2.13	16.00	0.18
N	2.42	1.69	36.43	2.16	5.17	0.16
NE	2.20	1.39	15.62	2.01	2.37	0.22
E	1.45	1.51	3.36	1.31	0.13	0.22
SE	1.54	1.42	4.27	1.40	0.21	0.27
S	1.85	1.45	7.07	1.68	0.58	0.28
SW	2.11	1.42	6.59	1.92	0.85	0.24
W	2.82	1.27	6.28	2.62	2.49	0.20
NW	2.88	1.90	20.37	2.56	4.20	0.16

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Elaborazioni statistiche: confronto di differenti climatologie per tempi di acquisizione 1 min.



Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

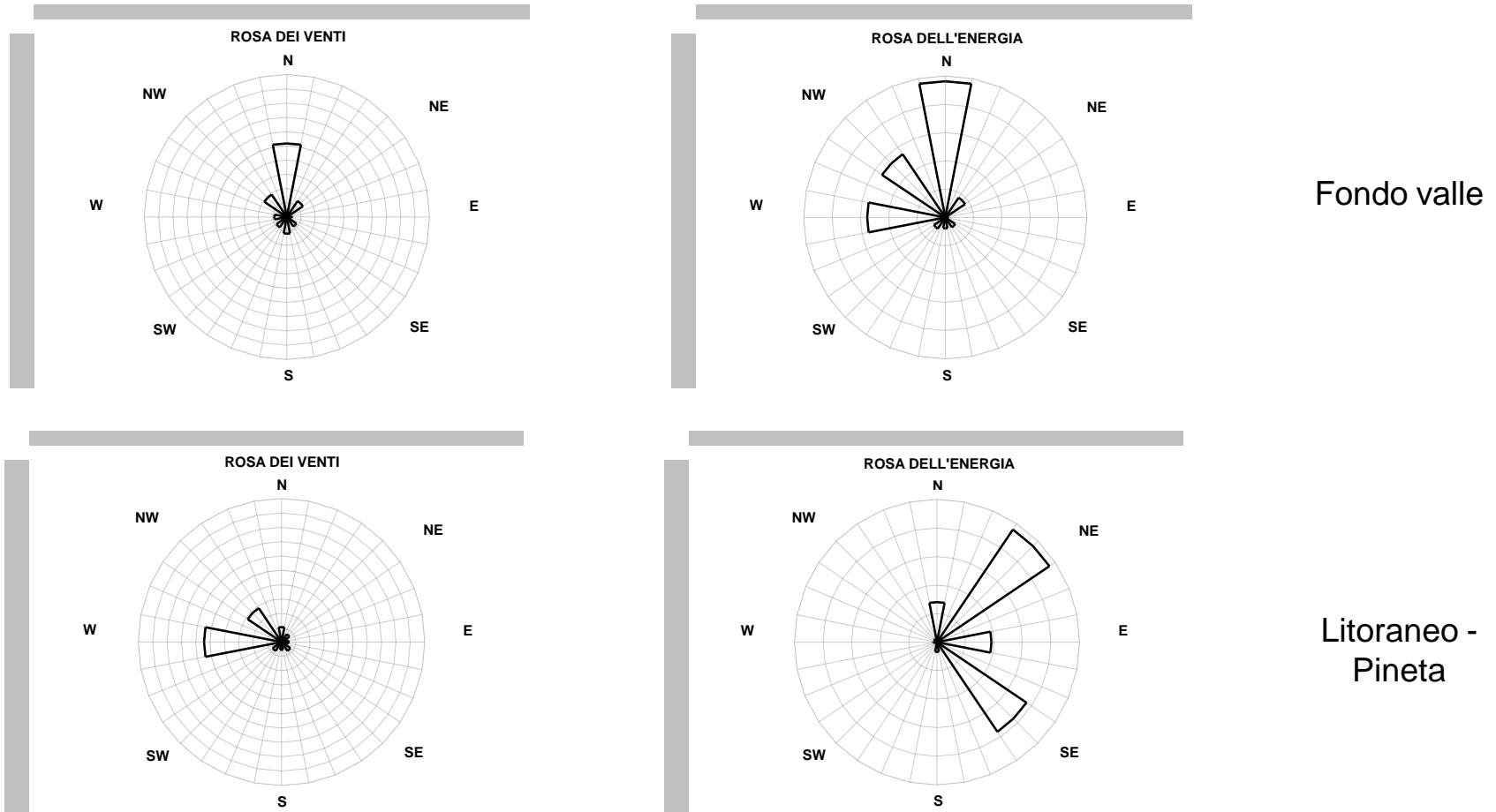
Elaborazioni statistiche: confronto di differenti climatologie per tempi di acquisizione 1 min.

Settore	Parametro A [m/s]	Parametro k [-]	Frequenza [%]	Velocità media [m/s]	Risorsa [W/m ²]	Turbolenza [%]
Media	4.45	1.89	100.00	3.95	75.69	0.00
N	4.82	2.30	34.40	4.27	27.56	0.00
NE	5.32	2.92	19.90	4.75	18.62	0.00
E	3.18	1.72	2.89	2.84	0.91	0.00
SE	2.41	1.72	2.22	2.14	0.30	0.00
S	4.87	1.74	9.77	4.34	10.89	0.00
SW	4.06	1.76	15.14	3.62	9.64	0.00
W	2.01	0.87	4.78	2.15	2.52	0.00
NW	3.34	1.46	10.91	3.03	5.25	0.00

Settore	Parametro A [m/s]	Parametro k [-]	Frequenza [%]	Velocità media [m/s]	Risorsa [W/m ²]	Turbolenza [%]
Media	2.24	1.52	100.00	2.02	13.45	0.30
N	2.32	1.68	46.66	2.07	5.90	0.23
NE	1.88	1.30	13.52	1.73	1.47	0.34
E	1.46	1.17	2.89	1.38	0.20	0.37
SE	1.65	1.22	4.91	1.54	0.43	0.37
S	1.78	1.58	7.31	1.60	0.46	0.41
SW	2.06	1.77	8.80	1.83	0.72	0.39
W	3.35	1.88	6.28	2.97	2.05	0.34
NW	2.76	1.61	9.65	2.48	2.22	0.31

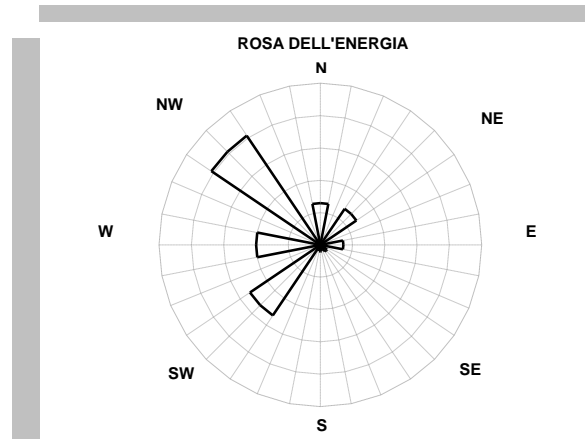
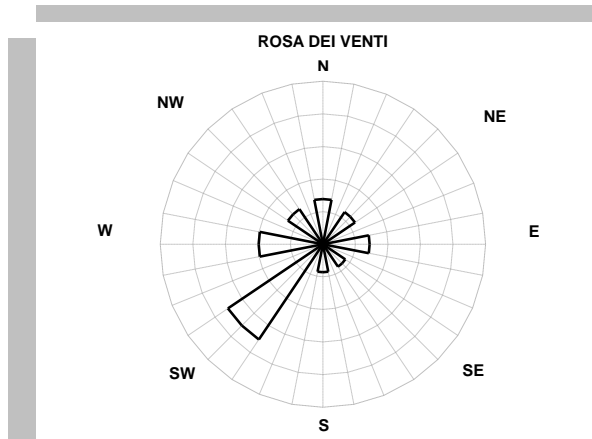
Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Elaborazioni statistiche: confronto delle rose dei venti e dell'energia per differenti climatologie

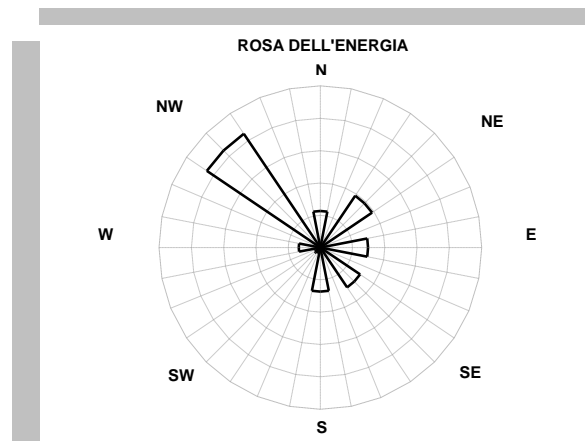
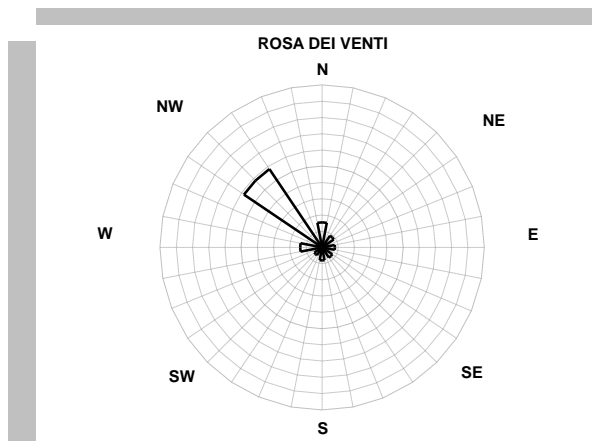


Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Elaborazioni statistiche: confronto delle rose dei venti e dell'energia per differenti climatologie



Crinale
montano



Marino

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Analisi sperimentale delle componenti verticali della velocità del vento sulla sommità di un edificio

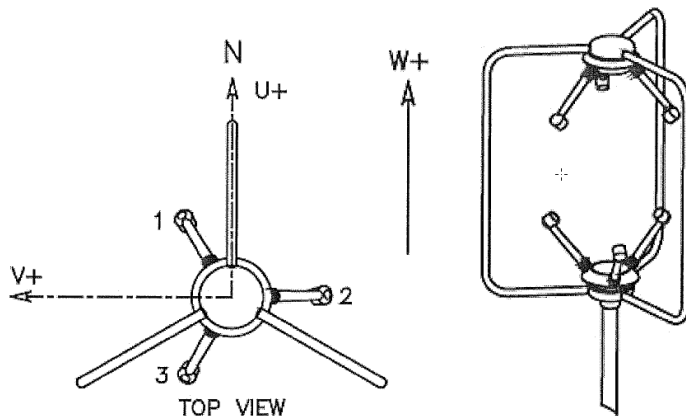
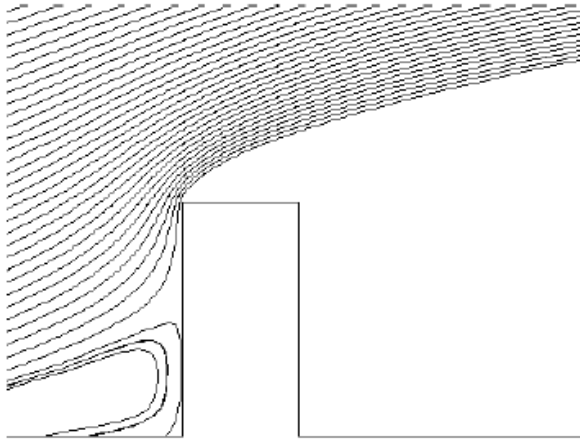


Lo scopo dell'indagine è quello di misurare e valutare le componenti verticali presenti sulla sommità di edifici con coperture piane. Tale tipologia di siti infatti rappresenta la casistica più favorevole di installazione di aerogeneratori ad asse verticale in aree urbanizzate.

Il sensore è posizionato a 4m dall'estremo sud dell'edificio.

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Analisi sperimentale delle componenti verticali della velocità del vento sulla sommità di un edificio



L'edificio che ospita la stazione di misura è di forma rettangolare di dimensioni (BxLxH) 13m X 55m X 9m posizionato longitudinalmente rispetto al Nord con un angolo di 327°.

$$V_h = \sqrt{u^2 + v^2} \quad \alpha = \arctan\left(\frac{u}{v}\right) + 90^\circ \quad \frac{w}{V_h}$$

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Analisi sperimentale delle componenti verticali della velocità del vento sulla sommità di un edificio

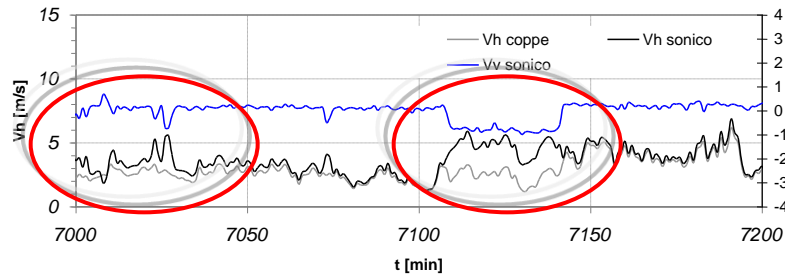
Dati validati Periodo di misura 01/02 - 02/03 2010	Soglia filtro su Vh [m/s]	Vv media [m/s]	Vh media [m/s]	ΔVh media [%]	Vz/Vh media [-]	Vz/Vh max [-]	Vz/Vh min [-]
Anemometro a coppe	0.00	-	2.17	-7.13%	-	-	-
Anemometro sonico 3D	0.00	0.08	2.24	0.00%	0.02	9.23	-13.17

L'apparecchiatura utilizzata per l'acquisizione ed il monitoraggio ha campionato i segnali con un frequenza pari a 0,5Hz e si è scelto un periodo di acquisizione pari a 1 minuto.

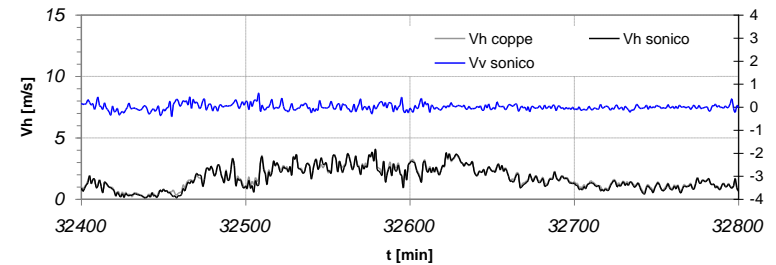
E' importante notare che **le componenti verticali possono assumere dei valori di assoluto rilievo per valori rilevati sulla scala temporale dei 0,5 Hz**. Infatti per tale scala temporale di riferimento possiamo avere che le componenti verticali assumono valori anche di dieci volte superiori alle corrispondenti componenti orizzontali. Sono proprio questi fenomeni non stazionari che generano una serie di implicazioni sulle macchine eoliche ad asse verticale i cui effetti possono essere spesso distruttivi ed imprevisi.

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

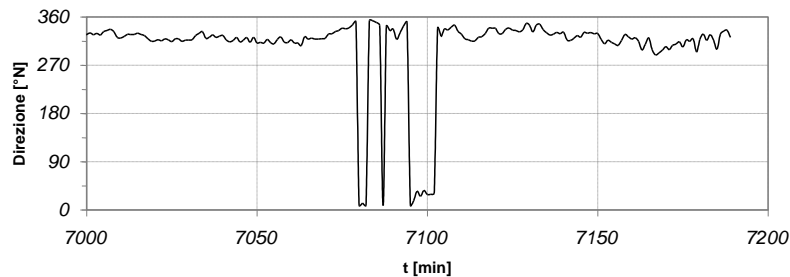
Confronto I: serie temporale anemometro sonico/coppe



Confronto II: serie temporale anemometro sonico/coppe

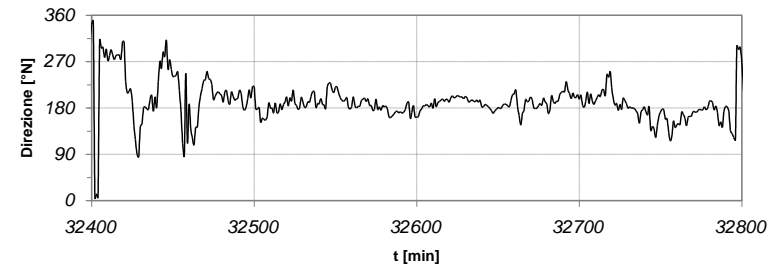


Confronto I: serie temporale anemometro sonico



Direzione Nord Ovest, medio-bassa intensità. Il sensore risente della forte vorticosità causata dalla completa lunghezza dell'edificio. Ad ogni modo le forti componenti discendenti (7100-7150) per la loro costanza non sembrerebbero associate a tale fenomeno di disturbo, bensì ad una particolare fenomenologia locale.

Confronto II: serie temporale anemometro sonico



Direzione Sud, medio-bassa intensità. Non si rilevano differenze sulla misura delle componenti verticali così come l'intensità di queste ultime è trascurabile. Il sensore è posizionato sul lato sopravvento dell'edificio, e per tanto il punto di misura non è coinvolto nei fenomeni vorticosi che caratterizzano il campo di moto sottovento.

Conduzione di campagne di misura della risorsa eolica in aree antropizzate

Considerazioni sull'analisi sperimentale condotta

L'analisi condotta su un **campione limitato di siti**, ha permesso di aumentare il livello di conoscenza sulle condizioni ambientali che caratterizzano i siti in ambiente antropizzato di interesse per lo sfruttamento della risorsa eolica.

Sulla sommità di edifici **l'indice di turbolenza tende ad assumere valori pressoché costanti rispetto all'intensità del vento**. I valori della risorsa specifica calcolata mettono in luce, soprattutto negli ambienti marini e montani, un discreto potenziale energetico che bene si presta ad essere convertito in lavoro elettrico.

L'analisi delle componenti verticali del vento indotte dall'edificio costituisce un punto di partenza per ulteriori indagini. La metodologia e le attrezzature sviluppate permetteranno di cogliere ulteriori aspetti del fenomeno, come la variabilità stagionale dei fenomeni, al carattere stesso dei fenomeni del movimento delle masse d'aria, siano essi dovuti a movimenti convettivi termici locali che a perturbazioni meteorologiche di estese, **distribuzione per bins di vento di $\Delta z/Vh$** .

Ulteriori indagini devono essere compiute per differenti altezze di misura e per differenti distanze dallo spigolo dell'edificio sopravvento. Tali indagini, poste in relazione rispetto alla forma ed alle dimensioni caratteristiche dell'edificio, permetteranno di ampliare la conoscenza sull'individuazione del punto di installazione ottimale.

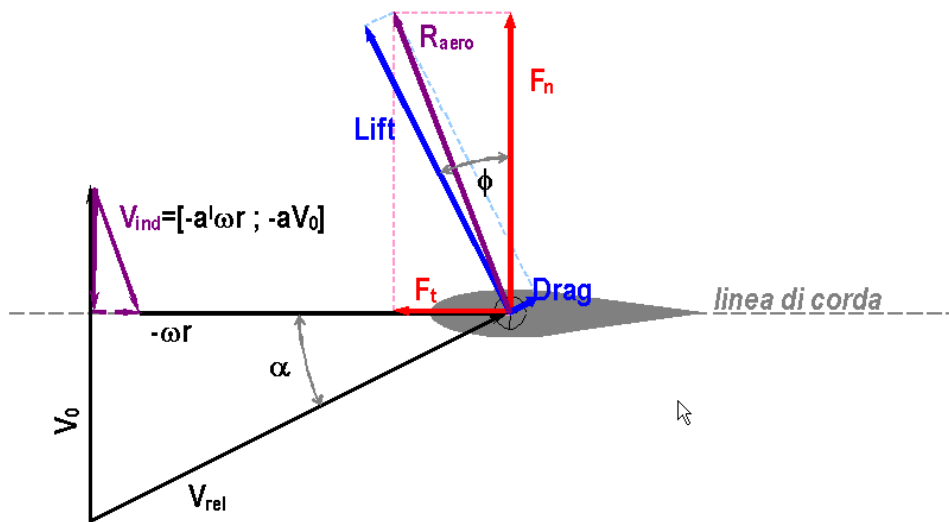
La componente verticale del vento sulla sommità di edifici può assumere valori di dieci volte superiore alla componente orizzontale. Tale fenomeno induce un errore nella misura della componente orizzontale di velocità del vento qualora, come solitamente avviene, venga effettuata per mezzo di sensori del tipo a coppe.

Porre attenzione ai **carichi che le componenti verticali** inducono sulla macchina (rotore). Le razze e gli afferraggi sono importanti dal punto di vista progettuale e bisogna tenerne conto al momento del dimensionamento e della verifica strutturale.

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT correlate all'analisi della risorsa eolica in aree urbanizzate

Principali metodi per la risoluzione del campo di moto di sistemi eolici

Il sistema eolico rallenta il vento raccogliendo il lavoro abbandonato sul rotore. **L'interazione fluido-macchina** determina **un'alterazione del campo di pressione attorno alla turbina** che produce sia i carichi che il lavoro. Per questa ragione, lo studio delle prestazioni delle turbine eoliche è inscindibile da quello e dei carichi, e vice versa.



Schema qualitativo del triangolo di velocità e forze sull'elemento di pala per una VAWT. Da notare che **la componente tangenziale della velocità indotta è tipicamente trascurata** nei predittori di prestazioni per VAWT.

I predittori delle prestazioni dei rotori hanno fondamentalmente l'obiettivo di risolvere il calcolo V_{ind} , la cui conoscenza permette di calcolare gli angoli d'attacco, le forze aerodinamiche agenti sulla pala e quindi prestazioni e carichi.

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

Principali metodi per la risoluzione del campo di moto di sistemi eolici

Metodo	Dim.	Input	Breve Descrizione
1) Disco Attuatore (passivo)	1D	V_0 Area spazzata "Permeabilità" del Disco	Risolve la conservazione della portata e della quantità di moto assiale.
2) BE-M (Blade Element – Momentum)	2D	V_0, ω Geometria $C_{lift}(\alpha), C_{drag}(\alpha)$	Accoppia la conservazione della quantità di moto assiale e tangenziale (Momentum) con il calcolo delle forze agenti su un elemento di pala (Blade Element) ricavate interpolando i database dei profili.
3) Vortex Wake (con scia prescritta o libera)	2D/3D	V_0, ω Geometria $C_{lift}(\alpha), C_{drag}(\alpha)$	Calcola la vorticità indotta da ogni sezione di pala e quindi a ritroso il campo di moto.
4) Actuator disc-CFD	2D/3D	V_0, ω Geometria $C_{lift}(\alpha), C_{drag}(\alpha)$ Proprietà fisiche dell'aria	Risolve l'equazione di Navier-Stokes/Eulero senza risolvere lo strato limite attorno alla pala. Modella il rotore come un disco dove agiscono delle forze ricavate interpolando i database dei profili.
5) Actuator line-CFD	3D	V_0, ω Geometria $C_{lift}(\alpha), C_{drag}(\alpha)$ Proprietà fisiche dell'aria	Risolve l'equazione di Navier-Stokes/Eulero senza risolvere lo strato limite attorno alla pala. Modella le pale come linee dove agiscono delle forze ricavate interpolando i database dei profili.
6) CFD (Computational Fluid Dynamics)	3D	V_0, ω Geometria Proprietà fisiche dell'aria	Risolve l'equazione di Navier-Stokes per ogni elemento in cui è suddiviso il campo di moto. Risolve lo strato limite partendo dalla superficie del profilo. Considera gli effetti viscosi del fluido e la turbolenza.

▪ Il metodo del disco attuatore è l'approccio più semplice ad un sistema eolico.

▪ Il BE-M è probabilmente la tipologia di predittore più diffusa nella pratica ingegneristica, sebbene non sia accurato in tutti i campi di funzionamento. Esso può essere declinato in versione stazionaria o dinamica ed in versione specifica per VAWT.

▪ Tutti i metodi tranne il metodo A ed il metodo F necessitano di conoscere le prestazioni dei profili aerodinamici ($C_{lift}(\alpha)$ e $C_{drag}(\alpha)$).

▪ In molti ambiti, si riserva il termine CFD ai soli metodi che risolvono lo strato limite mediante le equazioni di Navier-Stokes (metodo F).

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

Natura dei carichi e principali metodi per il loro calcolo

	Deterministici	Stocastici	
Aerodinamici	Raffiche		Estremi/Stazionari
	Wind shear, tower shadow	Turbolenza	Ciclici/Affaticanti
Gravitazionali	Peso		Estremi/Stazionari
			Ciclici/Affaticanti
Inerziali	Forza centrifuga, frenate ecc		Estremi/Stazionari
	Sbilanciamento rotore		Ciclici/Affaticanti

Per turbine VAWT si può affermare che:

1. per quanto riguarda i componenti rotanti, quali ad esempio le pale, la componente predominante di carico è quella centrifuga, sia in termine di valore assoluto che di contributo allo sforzo determinato sul materiale;
2. per quanto riguarda i componenti non rotanti quali, ad esempio, la struttura di sostegno, la componente predominante di carico sia la spinta aerodinamica.

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

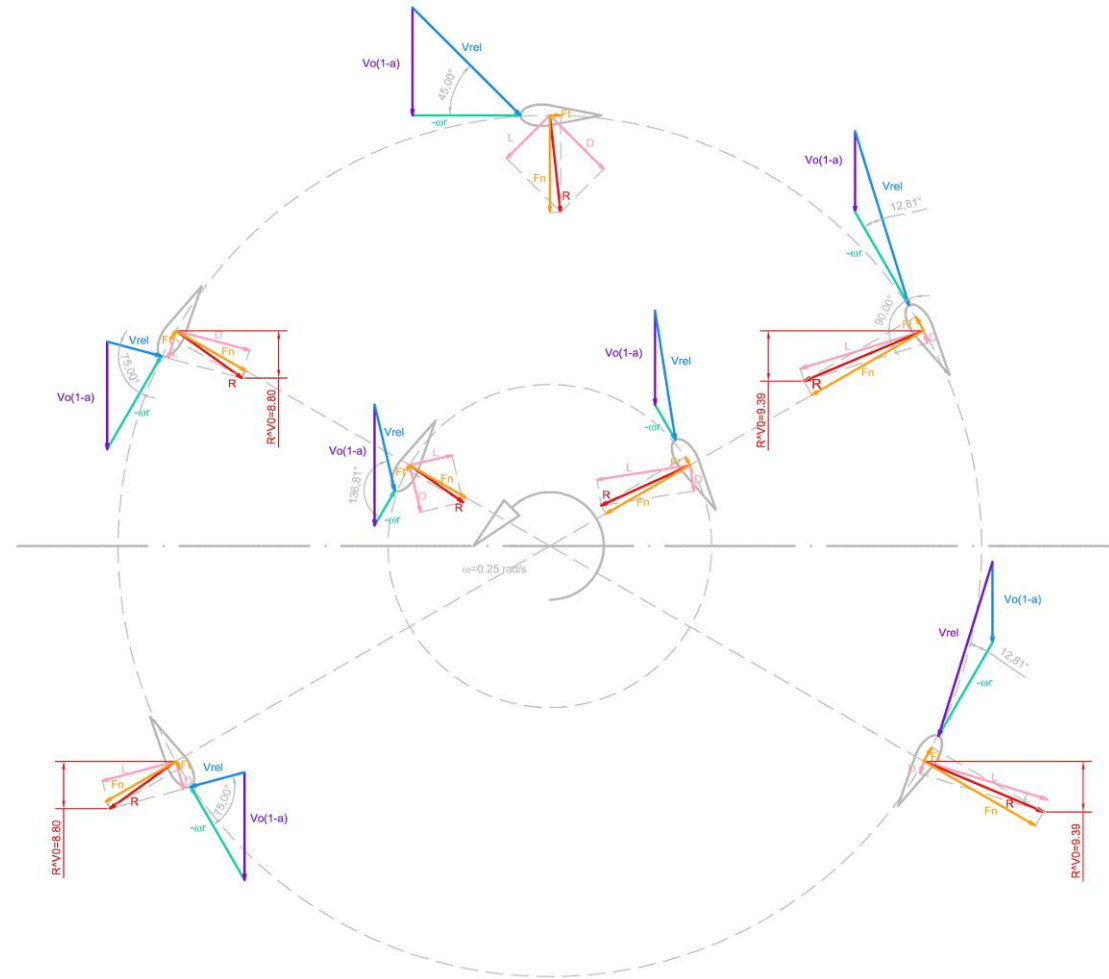
Natura dei carichi e principali metodi per il loro calcolo

I probabili motivi per cui **non sono stati sviluppati codici aeroelastici per VAWT** sono i seguenti:

1. difficoltà nel modellare accuratamente il campo di moto in regime instazionario, specialmente in relazione al periodico distacco dei vortici dal rotore;

2. prevalenza della componente centrifuga del carico sulle pale che rende la loro deformata poco sensibile alle variazioni dell'angolo d'attacco dovute alla turbolenza, a differenza delle turbine HAWT dove si innesca una vera e propria interazione aeroelastica;

3. minor numero di gradi di libertà del sistema di controllo: non si deve dimenticare che i codici aeroelastici sono nati per sviluppare ed ottimizzare il controllo a passo attivo delle turbine HAWT.



Schema qualitativo dei triangoli di velocità di una VAWT.

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

Valutazione delle prestazioni di un mini aerogeneratore

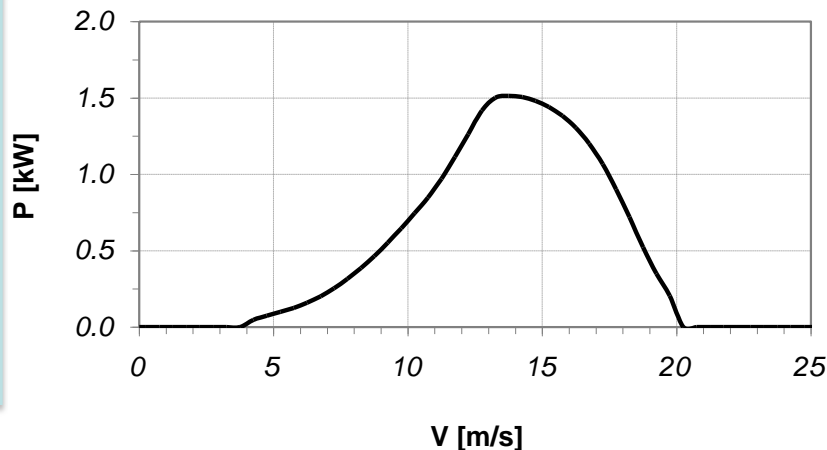
Dal punto di vista energetico, le prestazioni di un sistema eolico sono note quando si conosce la curva di potenza $P(V)$.

Le curve di potenza possono essere valutate con i seguenti metodi:

1. Predittori numerici

2. **Test in galleria del vento:** valutazione molto accurata delle prestazioni. Si possono eseguire solo su rotori di piccola taglia; le prestazioni riscontrate in campo potrebbero differire per effetto della turbolenza e di altri fattori ambientali non presenti.

3. **Test in campo:** campagna di misura in ambiente reale su di una turbina e una torre anemometrica “correlata” ed essa. La “correlazione” delle misure consiste nella garanzia che l’eventuale scia prodotta da ostacoli esterni, o dalla turbina stessa, non influenzi né la torre anemometrica né la turbina.



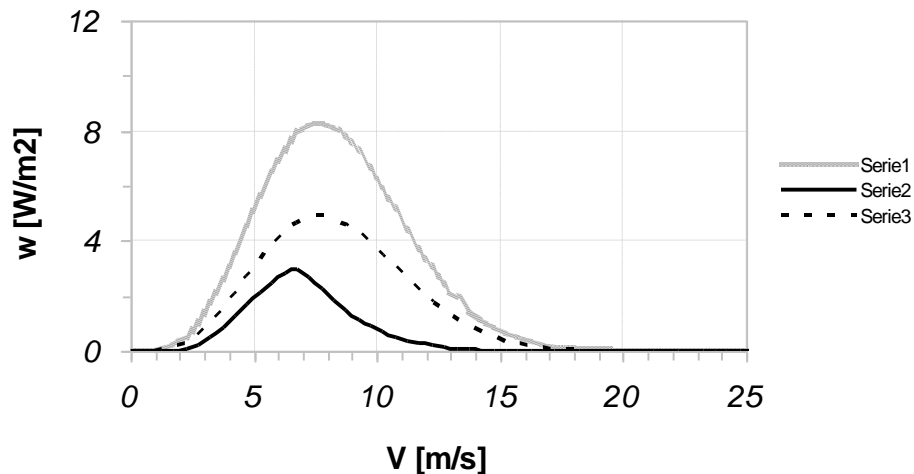
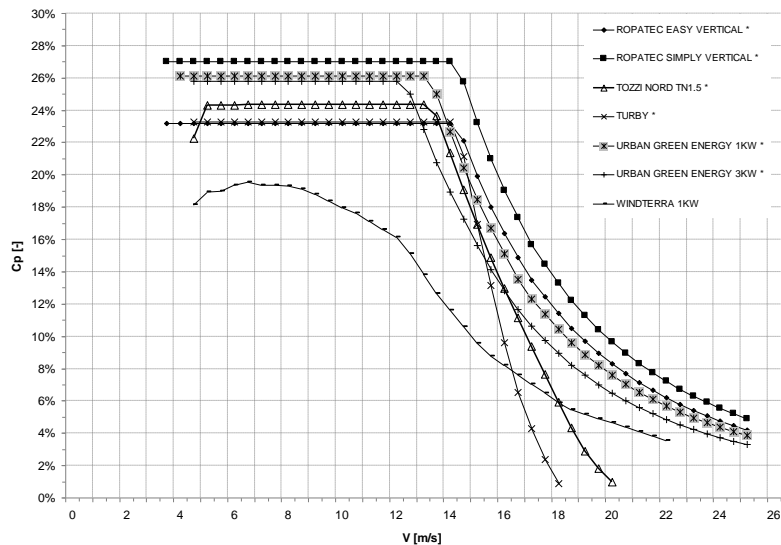
$$\frac{P}{C_p} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 = \text{costante per una certa turbina e } \forall \text{ punto operativo!}$$

$$w(V) = \frac{1}{2} \rho V^3 \cdot pdf(V)$$

$$AEO = \left(\sum_{V_i} w(V_i) \cdot C_p(V_i) \right) \cdot A \cdot T$$

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

Modello di Valutazione delle prestazioni di un mini aerogeneratore VAWT per ambienti antropizzati



PRODUCIBILITÀ ANNUA (kWh)									
MODELLO	P (kW)	VELOCITÀ MEDIA ANNUA (m/s)							
		3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5
Ropatec Easy Vertical	1	190	306	451	623	816	1023	1236	1448
Ropatec Simply Vertical	3	705	1134	1675	2314	3030	3796	4585	5375
Tozzi Nord TN 1.5	1,5	396	656	974	1334	1712	2088	2447	2776
Turby	2,5	724	1171	1698	2267	2840	3386	3883	4320
Urban Green Energy	1	373	598	876	1196	1547	1915	2287	2652
Urban Green Energy	3	942	1559	2324	3204	4159	5153	6150	7124
WindTerra	1	400	646	940	1267	1614	1967	2313	2644

Considerazioni progettuali per mini aerogeneratori VAWT

Modello di Valutazione delle prestazioni di un mini aerogeneratore VAWT per ambienti antropizzati

- in corrispondenza dei valori inferiori di intensità del vento, il contenuto energetico associato al flusso di vento intercettato dal rotore, di ridotte dimensioni, è esiguo;
- la catena dei rendimenti del treno elettromeccanico delle macchine eoliche incontra i limiti tecnologici proprio nelle macchine di piccola taglia, dove è più difficile contenere gli autoconsumi e mantenere sufficienti livelli di tensione nel sistema;
- per aerogeneratori di taglia di potenza di alcuni kilowatt quindi la raccolta di energia è di fatto delegata agli eventi di funzionamento corrispondenti ad una elevata intensità di vento e quindi eventi con un elevato contenuto energetico;
- tali eventi sono di fatto meno frequenti e pertanto le ore di funzionamento annue dell'aerogeneratore saranno minori (basso fattore di utilizzazione);

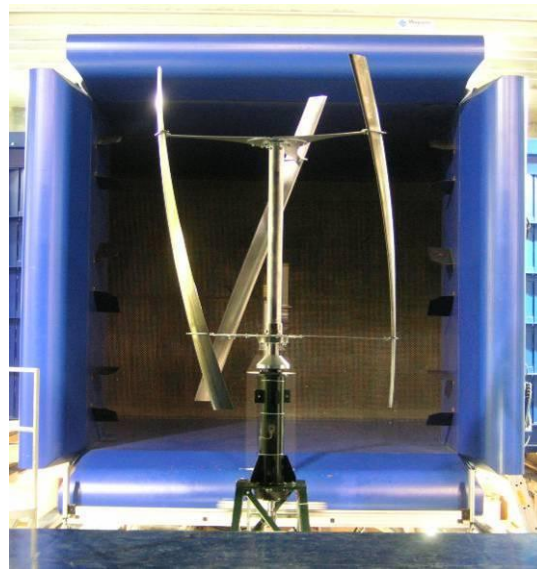
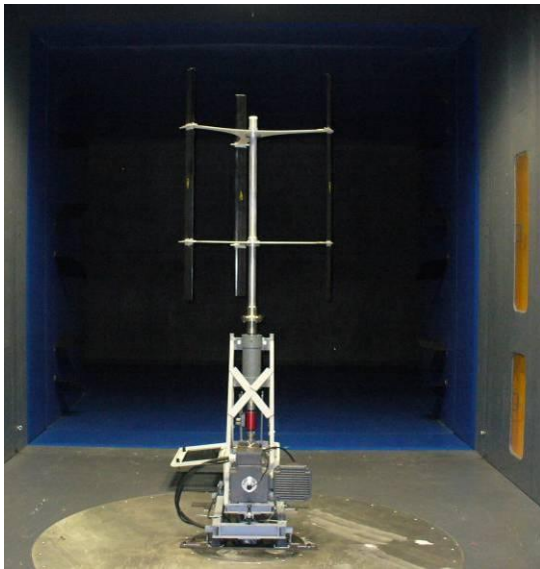
L'ottimizzazione di tali macchine eoliche deve seguire una strategia tale da conseguire una buona efficienza per valori elevati di velocità del vento, mantenendo un fattore di utilizzazione piuttosto modesto (poche ore annue di funzionamento).

IDEAZIONE DEL CONCEPT DI MACCHINA

Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

Le principali attività che durante la ricerca sono state condotte in collaborazione con la società Tozzi Nord S.r.l. e con il DIMS dell'Università degli studi di Trento sono state:

- progettazione, realizzazione e conduzione di prove strutturali su banco di laboratorio dei modelli in scala denominati PDF01 e PDF02;
- conduzione di prove aerodinamiche in camera chiusa su modelli PDF01 e PDF02 in galleria del vento presso il Politecnico di Milano;
- progettazione, realizzazione e conduzione di prove strutturali su banco di laboratorio del modello in scala denominato PDF03;
- conduzione di prove aerodinamiche in flusso aperto su modello PDF03 in galleria del vento presso il Politecnico di Milano;
- installazione e conduzione di prove di funzionamento in campo aperto.



Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

- rotore di tipo Darrieus con rapporto H/D pari a 2,8 ad elevata velocità di rotazione del rotore
- generatore trifase a magneti permanenti ad elevato numero di coppie polari con sistema integrato di lettura della velocità di rotazione;
- sistema di controllo attivo con logica innovativa di avviamento assistito della macchina;
- sistema indipendente di frenatura;
- inverter lato rete 220V monofase integrato.

DATI TECNICI		UNITÀ
Potenza nominale	1,5	kW
Velocità del vento nominale	13	m/s
Velocità di cut-in	4	m/s
Velocità di cut-out	20	m/s
N° di giri massimo	380	giri/min
Moltiplicatore di giri	Non presente	
Sistema di frenatura	Elettromeccanico	
N° di pale	3	
Materiale delle pale	Alluminio	
Connessione alla rete	SI'	
Tipo di generatore	Sincrono MP	
Voltaggio output	230	V
Frequenza output	50	Hz
Avviamento	Assistito	
Vita della turbina	20	Anni
DIMENSIONI		
Peso del rotore	~ 100	kg
Diametro del rotore	1,78	m
Altezza del rotore	2,5	m
Area spazzata	4,45	m ²

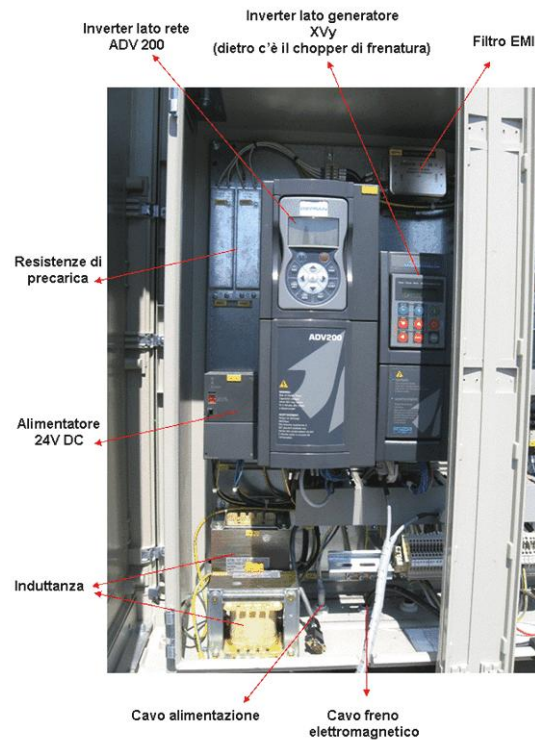


Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

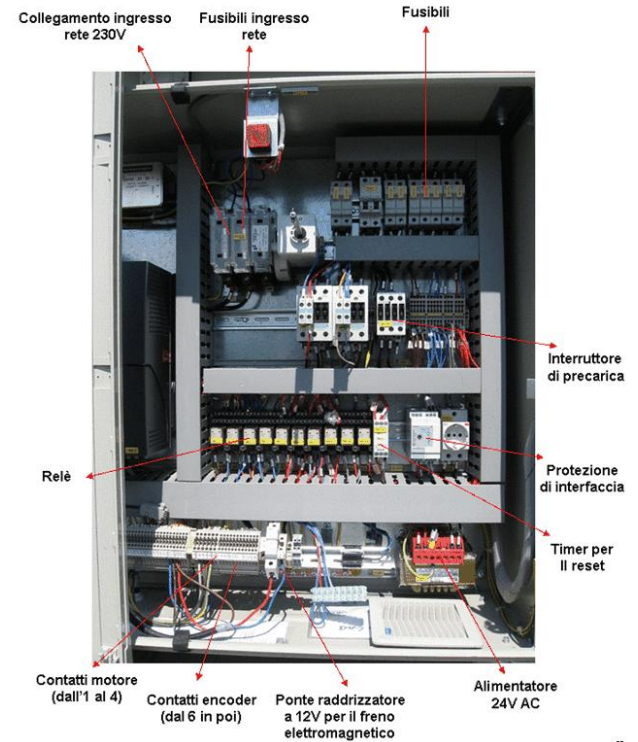
Il quadro di frenatura



Il quadro di potenza



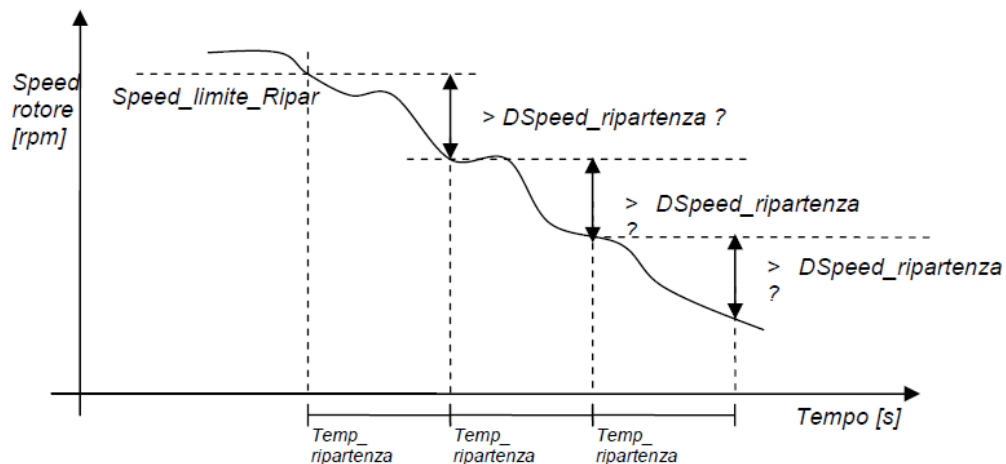
Il quadro di controllo



Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

La strategia di controllo sviluppata nella ricerca prevede il seguente schema funzionale:

- rilevamento della velocità minima di avvio dell'aerogeneratore in condizioni di macchina ferma. In alternativa è possibile utilizzare un algoritmo di avvio basato su tentativi ricorsivi ad intervalli temporali predefiniti;
- lancio di avvio alla velocità di funzionamento minimo del rotore;
- inseguimento del punto di massima efficienza in condizioni di funzionamento;
- in caso di diminuzione dell'intensità del vento, il rotore viene lasciato libero di girare fino a basse velocità. L'algoritmo accerta la presenza delle condizioni per il rilancio in corsa del rotore, attraverso la lettura della velocità ad istanti pre-fissati ed il confronto con la curva tempo-velocità riferita al caso di riferimento di decelerazione in totale assenza di vento;

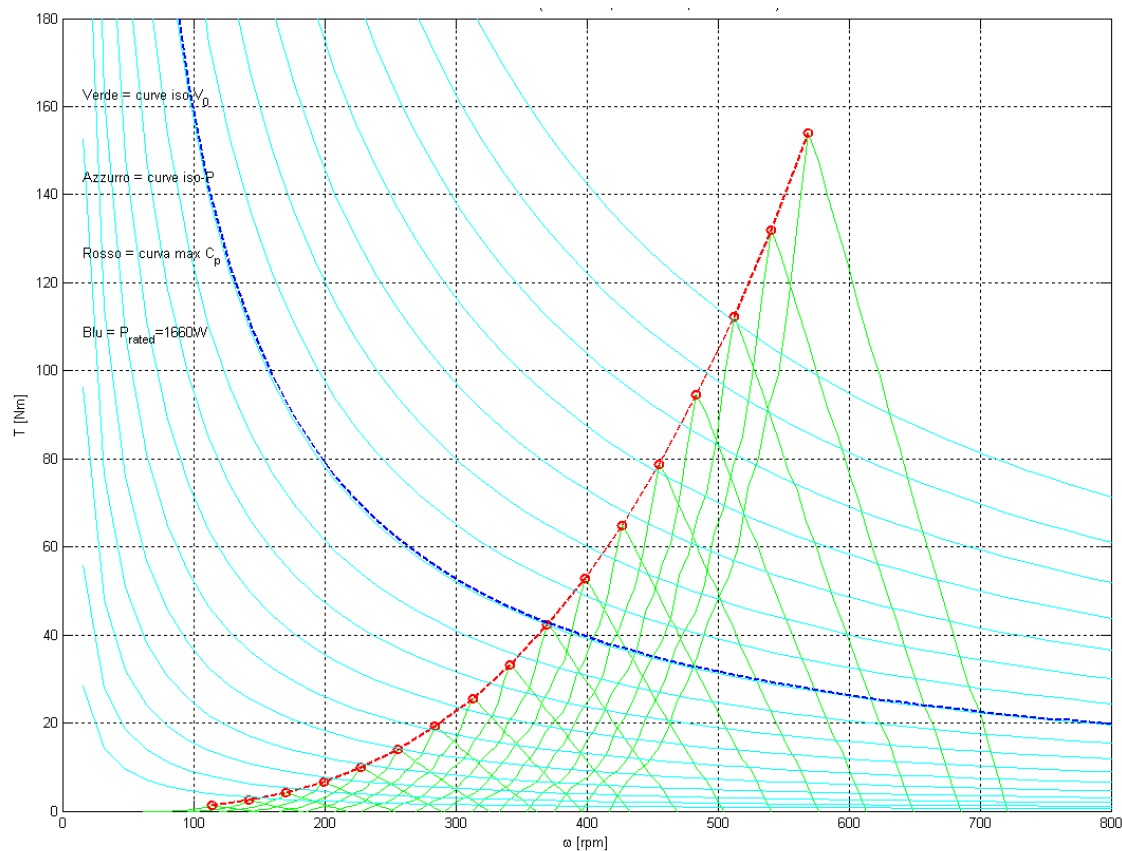


- limitazione di potenza e controllo del massimo numero di giri del rotore;
- frenatura ed arresto del rotore al di sotto della soglia inferiore di velocità di funzionamento del rotore;
- rilascio del cortocircuito delle fasi del generatore a macchina ferma in condizioni di attesa del vento;
- rilevamento della persistenza della condizione di vento eccessivo oltre un tempo limite di sicurezza. Il sistema rileva il numero di volte in cui la turbina entra nella fase di vento eccessivo e attraverso il confronto con un valore di riferimento ne sancisce l'arresto seguito da un tempo di fermo macchina pre-impostato.

Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

Valutazione delle prestazioni per via analitica

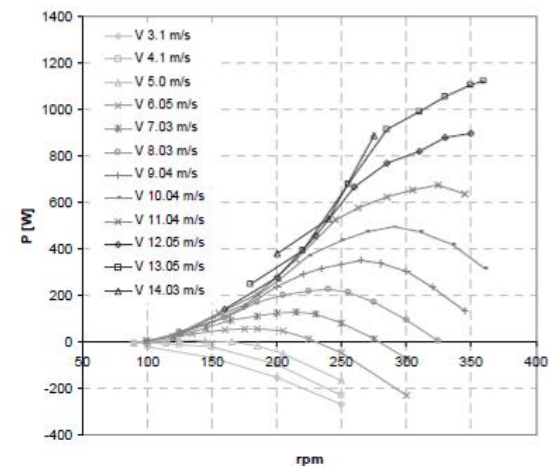
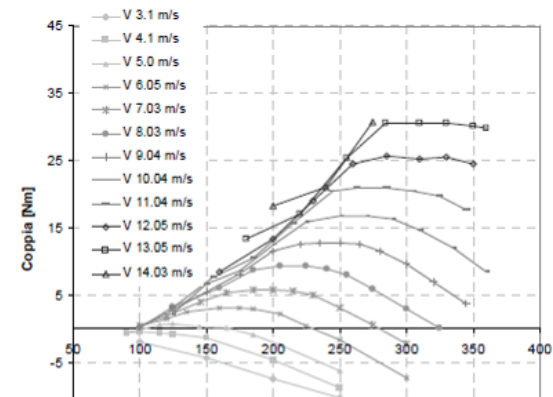
Le prestazioni dell'aerogeneratore TN-1.5 sono state stimate per via analitica attraverso l'implementazione di un modello numerico stazionario di tipo "double multiple streamtubes". Tale modello applica la teoria del disco attuatore ad una discretizzazione del tubo di flusso che si genera nel momento in cui il rotore viene investito da un flusso d'aria.



Il VAWT utilizzato per la conduzione delle indagini sperimentali

Valutazione delle prestazioni attraverso prove in galleria del vento

Curve di coppia e di potenza elettrica in funzione del numero di giri ottenute per differenti valori di intensità del vento.



Campi di prova e sistemi di acquisizione impiegati

Valutazione delle prestazioni attraverso prove in sito

Campo di prova di Trento



Campi di prova e sistemi di acquisizione impiegati

Valutazione delle prestazioni attraverso prove in sito

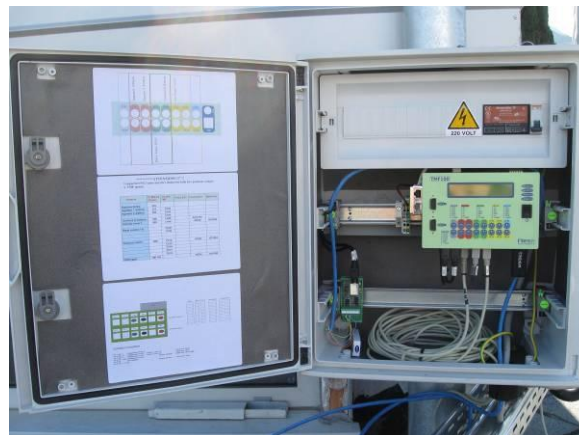
Campo di prova di Messina – CNR ITAE Istituto Nicola Giordano -



Campi di prova e sistemi di acquisizione impiegati

Valutazione delle prestazioni attraverso prove in sito

Campo di prova di Torbole sul Garda (TN)



Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Finalità

- valutazione e realizzazione di differenti tipologie di basamento e di strutture di supporto adatte ad essere impiegate sulla sommità di edifici;
- implementazione e collaudo di differenti strategie di avviamento assistito dell'aerogeneratore;
- valutazione e collaudo del sistema di inseguimento del punto di massima efficienza in condizioni di funzionamento;
- implementazione e collaudo del sistema di ri-avvio in corsa in presenza di fenomeni transitori di diminuzione dell'intensità del vento;
- implementazione e collaudo del sistema di limitazione di potenza e di controllo del massimo numero di giri del rotore;
- implementazione e collaudo del sistema di frenatura ed arresto del rotore al di sotto della soglia inferiore di velocità di funzionamento del rotore;
- implementazione e collaudo del sistema di rilascio del cortocircuito delle fasi del generatore a macchina ferma in condizioni di attesa del vento;
- implementazione e collaudo del sistema di rilevamento della persistenza della condizione di vento eccessivo oltre un tempo limite di sicurezza.
- parcheggio.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

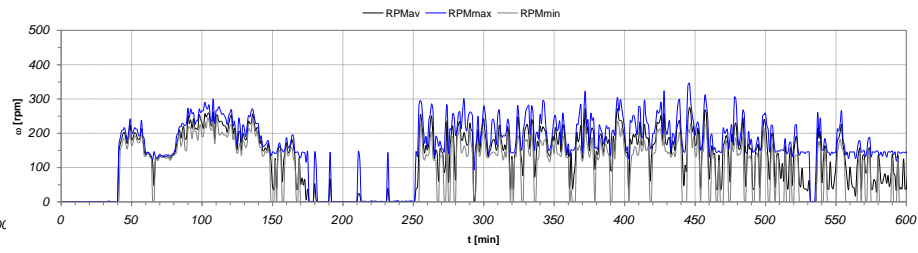
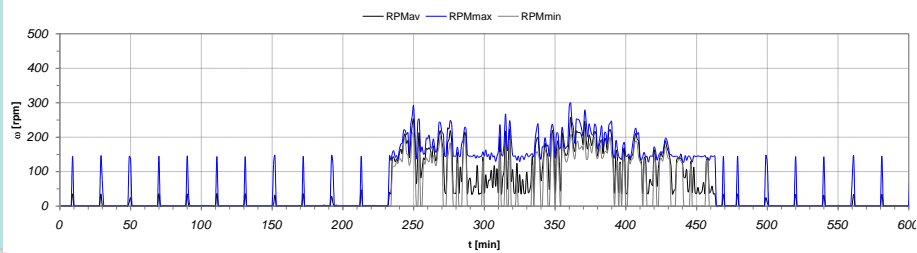
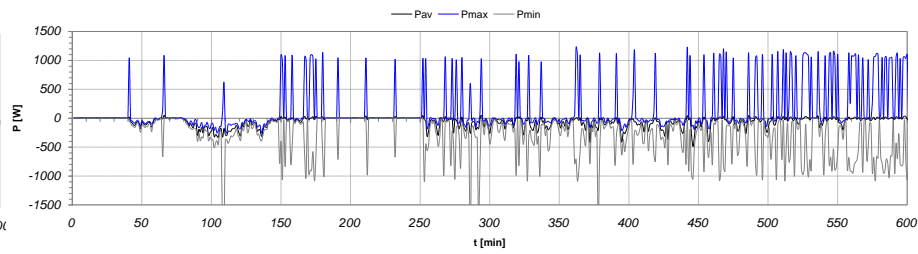
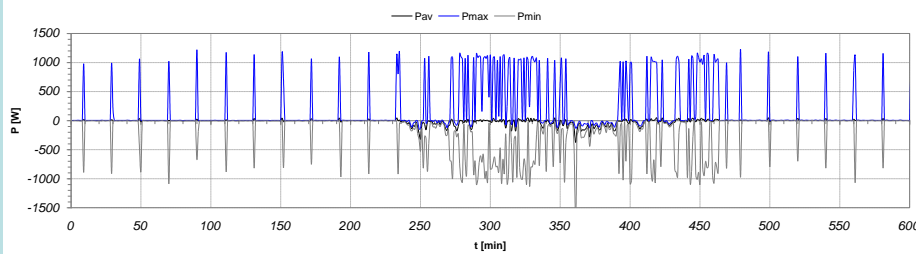
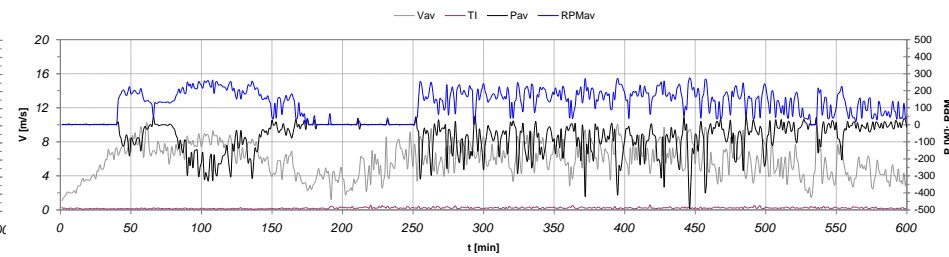
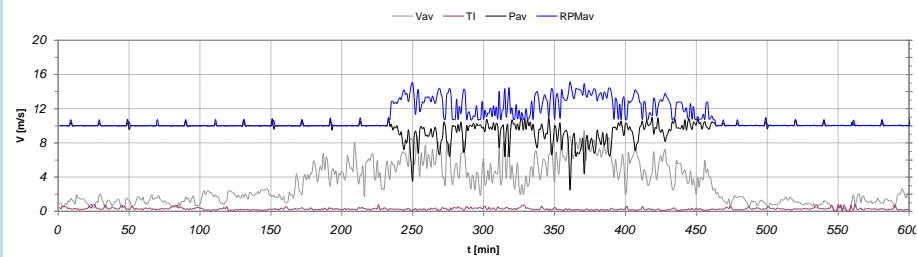
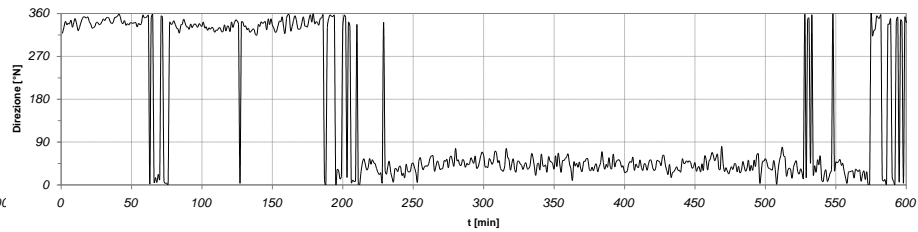
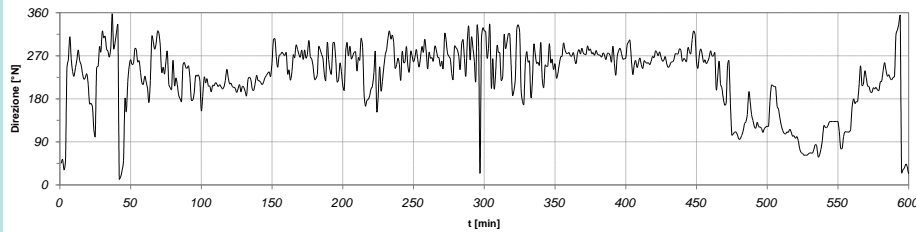
Acquisizione e validazione dei dati

Sotto periodi validati	STAZIONE cod.01 Periodo totale di acquisizione 01/09/2009 - 11/03/2010		STAZIONE cod.03 Periodo totale di acquisizione 15/09/2009 - 21/10/2009		STAZIONE cod.05 Periodo totale di acquisizione 18/10/2010 - 11/03/2010	
	Da [aaaammgghhmmss]	A [aaaammgghhmmss]	Da [aaaammgghhmmss]	A [aaaammgghhmmss]	Da [aaaammgghhmmss]	A [aaaammgghhmmss]
01	20090901120000	20090910150000	20090915000100	20090923204000	20091018000000	20091020150000
02	20090912080000	20090931235900	20090929120000	20090930235900	20091020170000	20091023150000
03	20091101020000	20091104163500	20091005101000	20091010230000	20091203200000	20091213043000
04	20091104174300	20091124130000	20091011100000	20091021070000	20091217125000	20091219040000
05	20091124170000	20091130235900			20091222010300	20091222210000
06	20091201000200	20091211170000			20091229112000	20091230050000
07	20091211181200	20091231235900			20100101005000	20100101115950
08	20100101000100	20100131235900			20100102120000	20100102170900
09	20100201000100	20100211110000			20100224130000	20100228235950
10	20100211110100	20100217180000			20100301000000	20100311150000
11	20100217180100	20100302120000				
12	20100302121100	20100311110000				

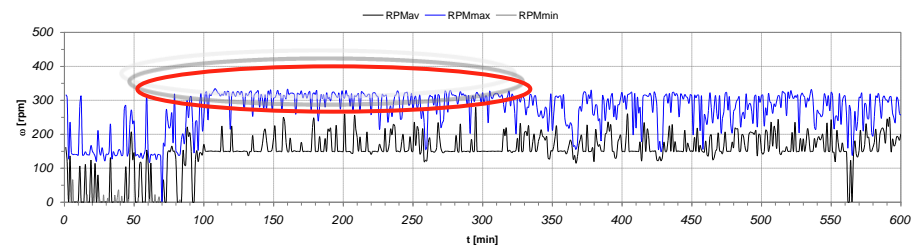
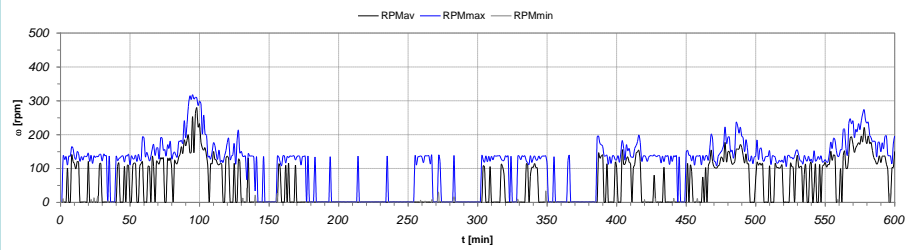
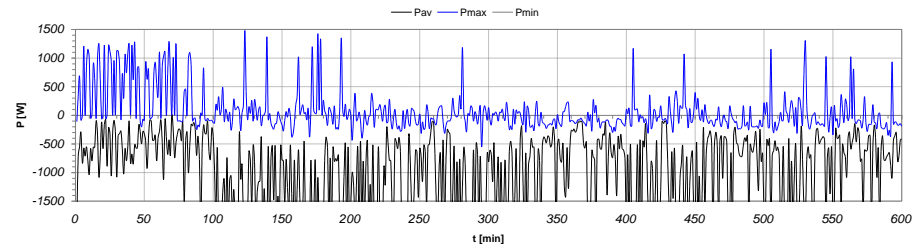
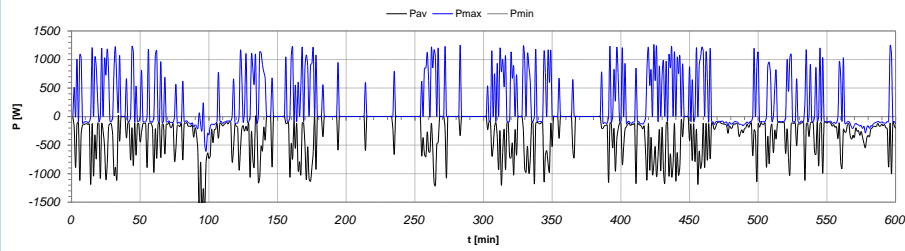
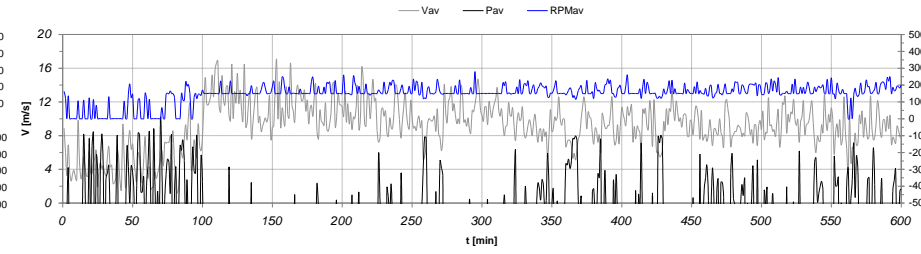
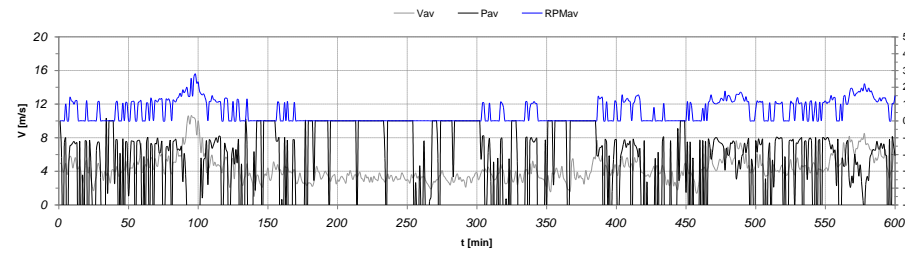
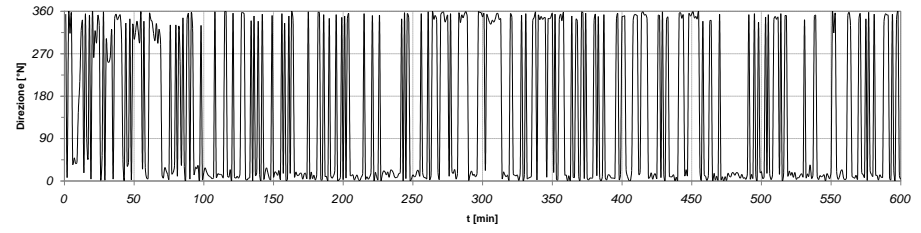
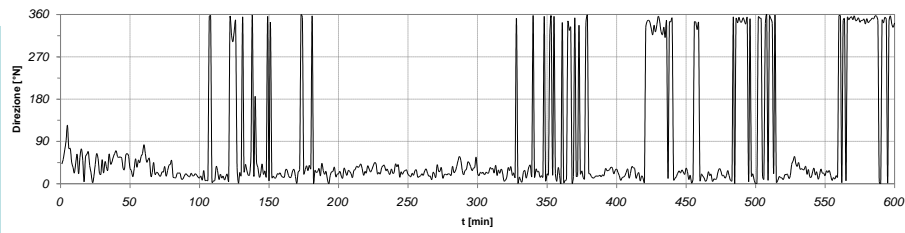
Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Elaborazione dei dati – casi di studio –

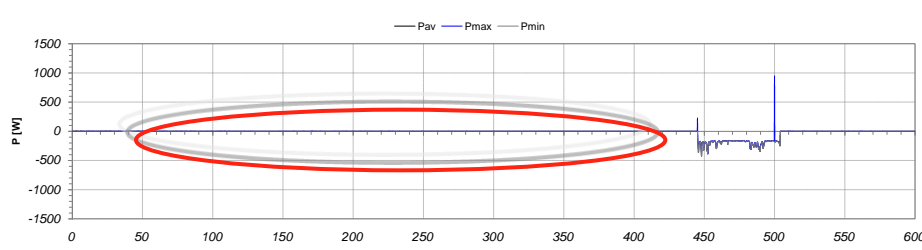
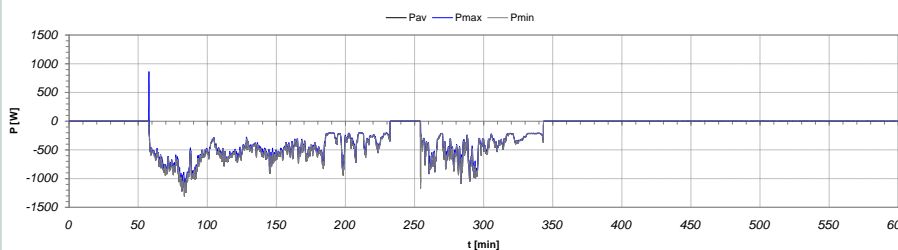
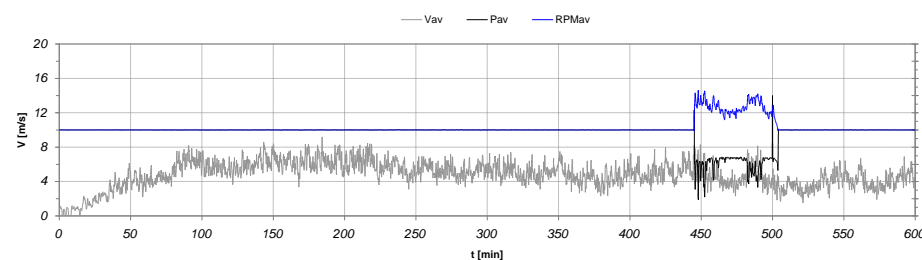
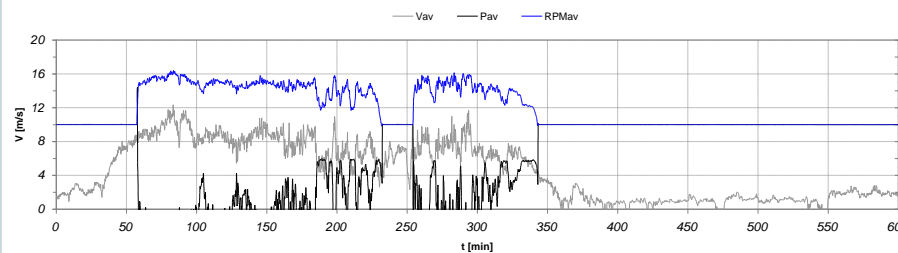
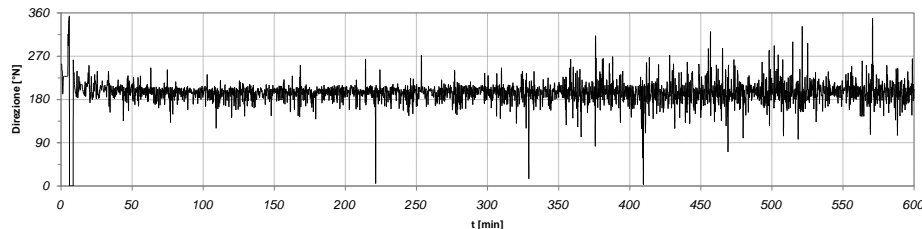
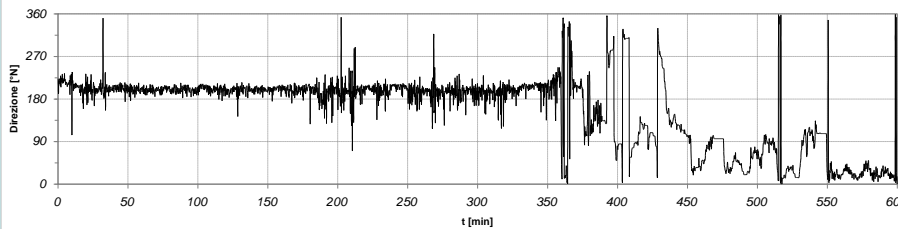
- **Caso:** riferimento al **caso di studio di periodo di 10h** in esame;
- **Intervallo temporale di acquisizione:** rappresenta il periodo di tempo con cui l'acquisitore restituisce il dato nella serie temporale. Tale dato è costituito da un valore medio sull'intervallo temporale, dal valore massimo misurato, dal valore minimo e dalla deviazione standard del dato sull'intervallo;
- **Algoritmo di avviamento:** rappresenta la tipologia di avviamento della macchina implementato nel periodo di misura. In particolare le logiche di avviamento sviluppate sono di due tipi: TEMPO – l'auto avvio della macchina avviene indipendentemente dalle condizioni ambientali ma ad intervalli sequenziali **T1, T2, T3, T4, T5, T6**. Se dopo il lancio del rotore il sistema di controllo non rileva un valore di coppia all'albero tale da fare accelerare la macchina ne impone la fermata e attende l'avvio successivo. Se la macchina invece entra in generazione la procedura si resetta e riprenderà all'evento di vento successivo. **AUTO DETECT** – sfruttando le sonde ad effetto Hall integrate nel generatore la velocità del rotore viene misurata anche in condizioni di assenza di vento, a rotore fermo. In presenza di vento il movimento del rotore viene percepito dall'algoritmo di controllo che ad un valore opportuno (velocità rotorica di avvio) comanda il lancio assistito della macchina eolica.
- **Velocità rotorica massima:** massima velocità di rotazione del rotore a cui è limitato in modo attivo attraverso il sistema di controllo;
- **Velocità rotorica di arresto:** velocità di rotazione alla quale il sistema di controllo frena e arresta l'aerogeneratore;
- **Kshift:** rappresenta un coefficiente moltiplicativo applicato alla curva di controllo teorica coppia-numero di giri che l'algoritmo di controllo fa seguire all'aerogeneratore.



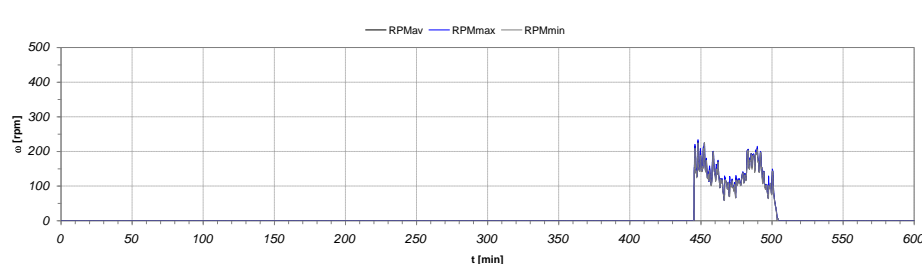
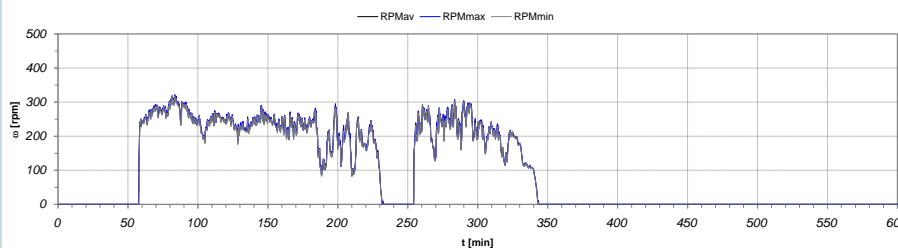
Serie temporale delle grandezze acquisite (1min) presso la stazione 01 relative al caso di studio n.2 (sin) e n.3 (dx)



Serie temporale delle grandezze acquisite (10s) presso la stazione 03 relative al caso di studio n.3 (sin) e n.5 (dx)



AVVIAMENTO??



Serie temporale delle grandezze acquisite (10s) presso la stazione 05 relative al caso di studio n.4 (sin) e n.5 (dx)

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Elaborazione dei dati – serie di lungo periodo -

Codice di calcolo implementato in linguaggio MATLAB® . Il codice utilizza come input i dati validati del sottoperiodo da analizzare e, dopo avere verificato la coerenza dei segnali, restituisce come output i seguenti elaborati e grandezze principali:

- Valore della potenza massima istantanea assorbita nel periodo (segno +);
- Valore della potenza minima istantanea generata nel periodo (segno -);
- Valore massimo della potenza media assorbita (segno +) sull'intervallo di acquisizione;
- Valore minimo della potenza media generata (segno -) sull'intervallo di acquisizione;
- Numero di avviamenti in condizione di macchina ferma (start avvio) nel periodo;
- Numero di avviamenti in condizione di macchina in movimento (start in corsa) nel periodo;
- Energia netta generata nel periodo ;
- Energia assorbita per starts avvio nel periodo;
- Energia assorbita per starts in corsa nel periodo;
- Serie temporale della intensità della velocità del vento, direzione, Potenze massima, minima e media, velocità di rotazione del rotore massima, minima e media;
- Curva di potenza teorica con scatter dei segnali di potenza media misurati;
- Curva di controllo teorica con scatter dei segnali di velocità di rotazione media misurati;
- deviazione standard della velocità di rotazione misurata in funzione dell'intensità del vento.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Elaborazione dei dati – serie di lungo periodo -

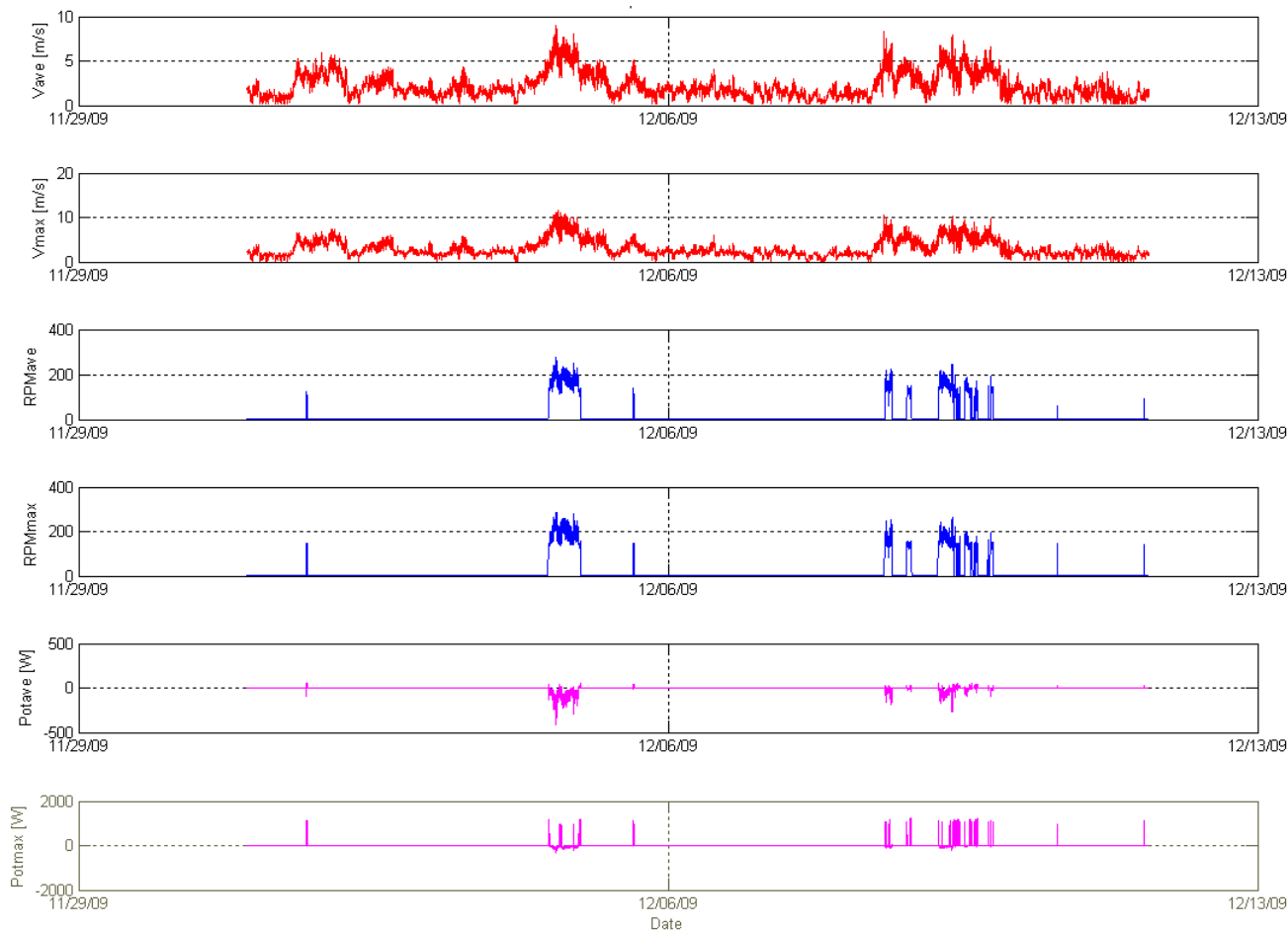
Riepilogo dei principali parametri di controllo del VAWT in staz. di prova cod. 01 corrispondenti ai sotto periodi di dati validati.

Intervallo temporale di acquisizione		Sotto periodi di misura – Stazione cod.01											
[s]	60	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12
Algoritmo di avviamento*	[-]	T	T	T	T	T	AD	AD	AD	AD	AD	AD	AD
Vel. rotorica di avvio	[rpm]	-	-	-	-	-	3	3	3	3	3	1	1
Vel. rotorica massima	[rpm]	300	300	300	300	350	350	350	350	350	350	350	350
Vel. rotorica di arresto	[rpm]	115	115	115	115	115	20	20	20	20	20	20	20
Kshift	[-]	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	1	1
P max istantanea generata	[W]	- 1737	- 2004	- 1111	- 2007	- 2013	- 2004	- 2013	- 2013	- 2013	- 2013	- 2013	- 2013
P max istantanea assorbita	[W]	1580	1644	1340	1601	1987	1217	1987	1219	1987	1225	1235	1241
Max P media generata	[W]	-377	-636	-107	-132	-1999	-417	-1998	-789	-1429	-430	-515	-2000
Velocità Rotore Max	[rpm]	300	353	213	232	212	288	264	362	301	318	351	339
Energia Consumata	[Wh]	790	2002	413	1684	394	620	1234	1919	613	364	730	561
Energia Prodotta	[Wh]	-743	-2351	-103	-241	-157	1035	-287	3344	-1214	-349	-911	3795
Energia netta scambiata	[Wh]	47	-349	310	1443	237	-415	946	1425	-601	16	-181	3234
N. di avviamenti	[-]	827	1823	323	1493	83	46	27	99	42	33	150	153
N. di avviamenti in corsa	[-]	52	81	21	93	60	32	28	81	26	31	142	151

* T= TEMPO; AD= AUTO DETECT

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

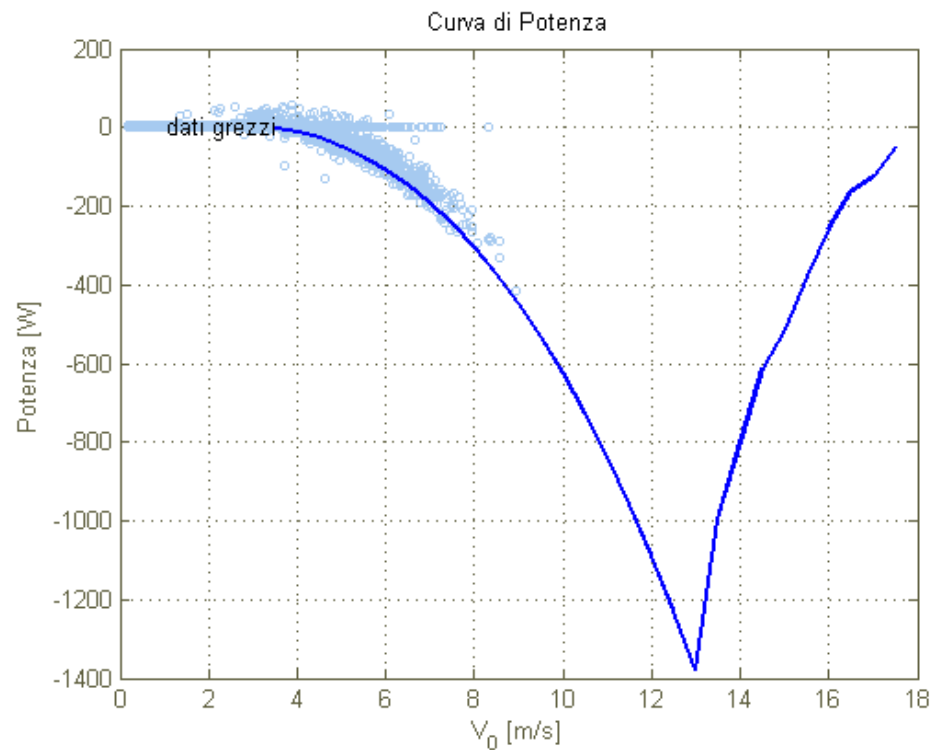
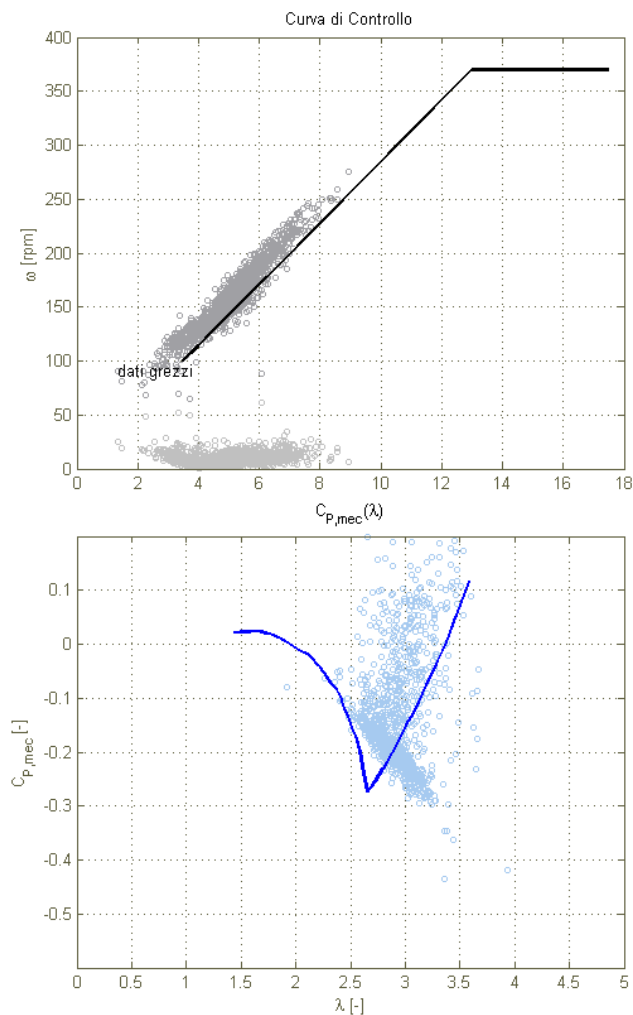
Elaborazione dei dati – serie di lungo periodo -



Elaborato grafico stazione 01 – sotto periodo 06.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

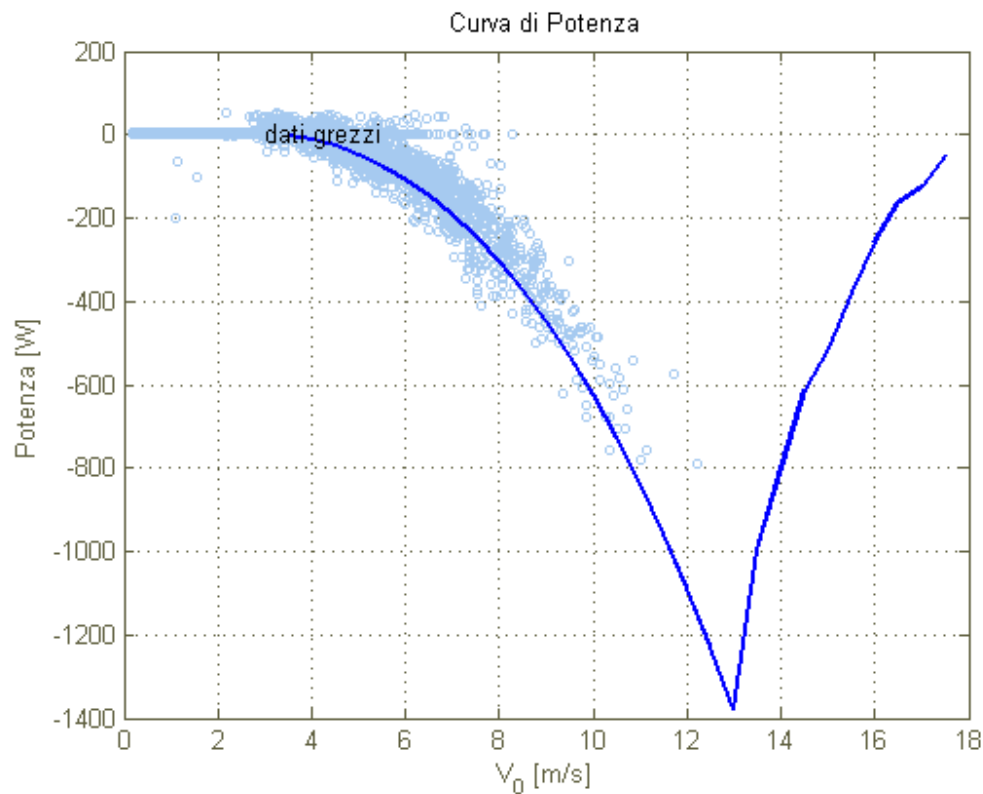
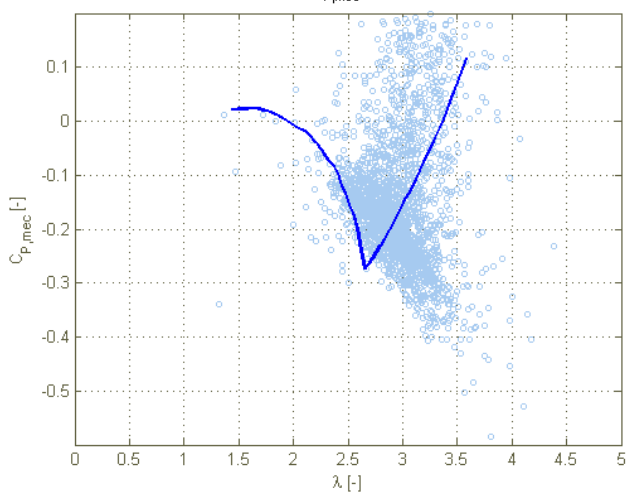
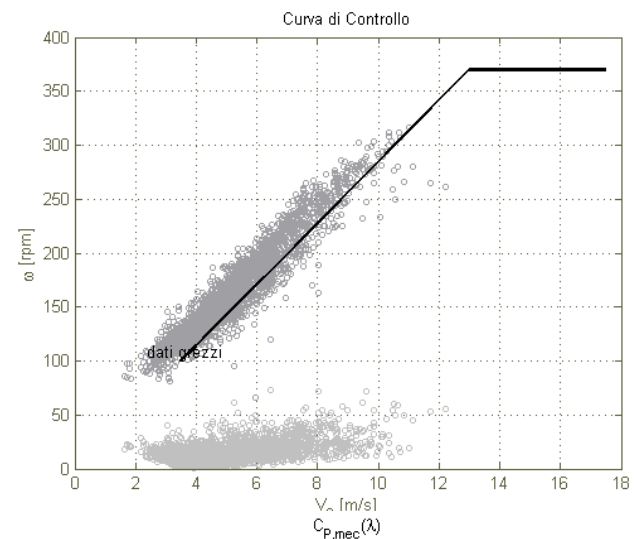
Elaborazione dei dati – serie di lungo periodo -



Elaborato grafico stazione 01 (1 min) – sotto periodo 06.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Elaborazione dei dati – serie di lungo periodo -



Elaborato grafico stazione 01 (1 min) – sotto periodo 08.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Studio delle condizioni di avviamento in sito

Il medesimo codice MATLAB® dispone di una funzione che permette lo studio in post processing dei fenomeni di avvio dell'aerogeneratore.

Per ogni sotto periodo il codice individua gli eventi di avvio della macchina qualunque sia l'algoritmo che ne ha comandato l'azione. Oltre al numero totale di eventi di avvio effettuati sul sotto periodo in esame il codice effettua la analisi delle condizioni ambientali corrispondenti all'evento.

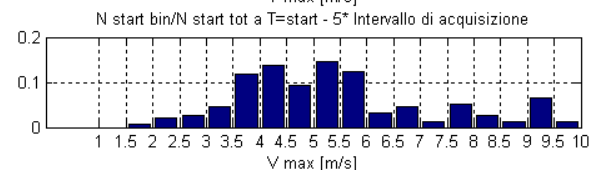
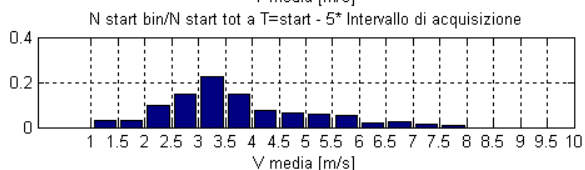
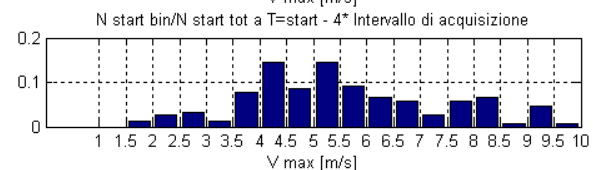
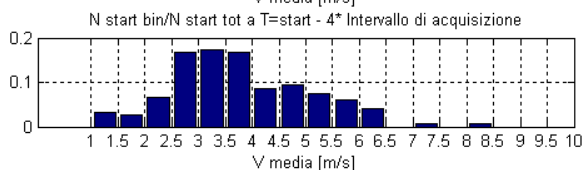
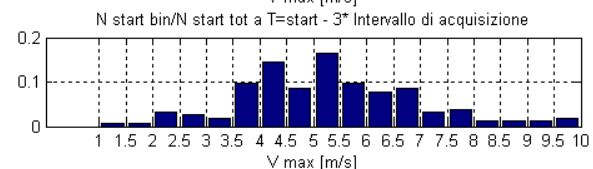
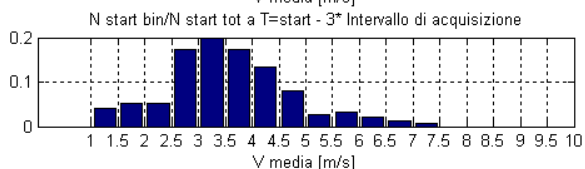
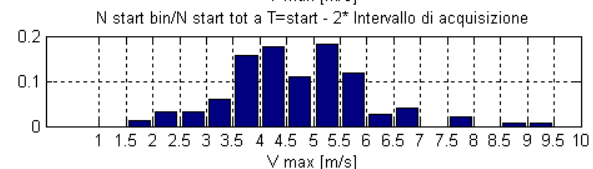
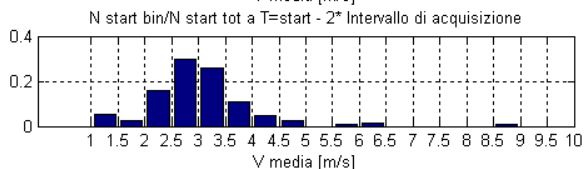
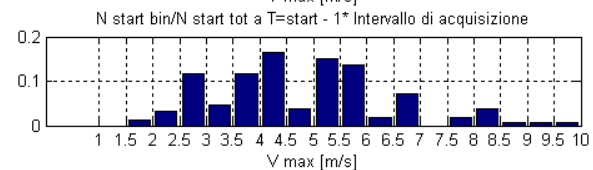
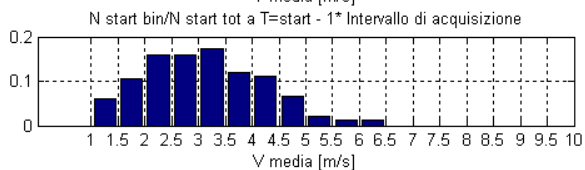
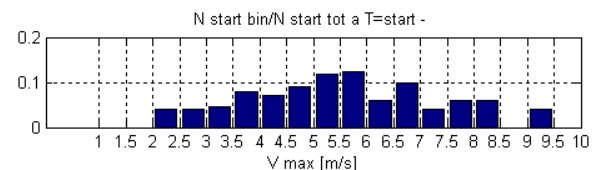
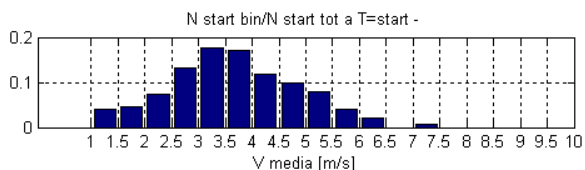
Il rotore del prototipo TN1.5 non dispone di una sufficiente coppia di avviamento, per tanto non è in grado di raggiungere autonomamente una velocità di rotazione tale da permettere al profilo aerodinamico delle pale di lavorare alle condizioni di progetto. Tale caratteristica però, in condizione di macchina parcheggiata, non impedisce al rotore di muoversi qualora l'intensità del vento superi una determinata soglia minima di velocità del vento. Il risultato che si intende raggiungere nell'analisi che segue è, unitamente alla comprensione del fenomeno, l'individuazione di questo valore.

Lo studio condotto pone la sua attenzione sull'individuazione della **soglia di avvio** dell'aerogeneratore in modalità di avvio di tipo auto detect. Tale valore non è univocamente determinato a causa della caratteristica del vento reale che in ambienti antropizzati si discosta in modo significativo rispetto alle condizioni ideali di funzionamento.

L'analisi dei casi presentati rileva che la velocità media del vento corrispondente alla **condizione di avvio dell'aerogeneratore TN1.5 è compresa tra i 4 ed i 6 metri al secondo**. Tale velocità rappresenta il valore medio sull'intervallo di acquisizione; lo studio rileva che il fattore che influisce maggiormente sulla condizione di avvio è il valore massimo associato nel medesimo intervallo (raffica). Non sembra che le condizioni ambientali antecedenti l'evento di avvio influenzino in modo significativo il fenomeno.

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

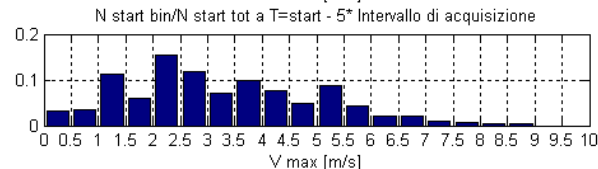
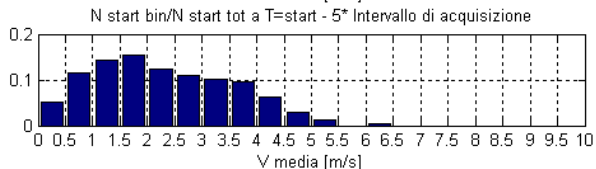
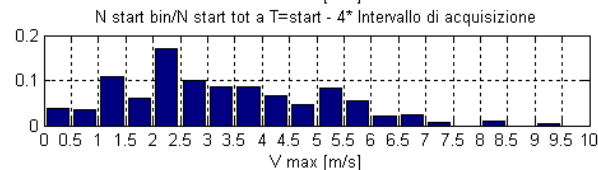
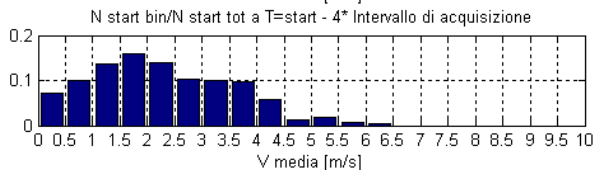
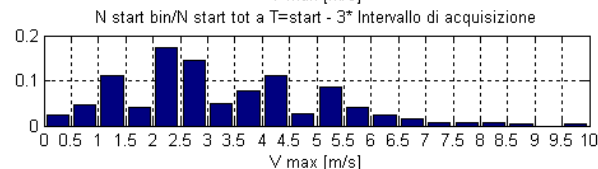
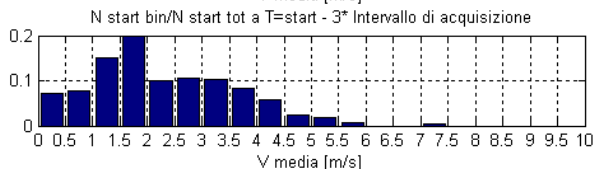
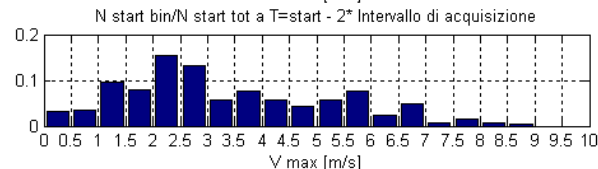
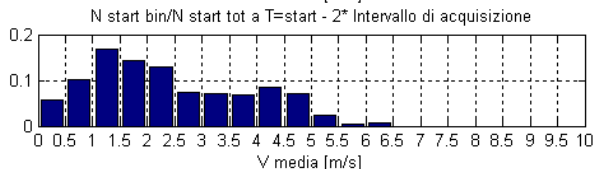
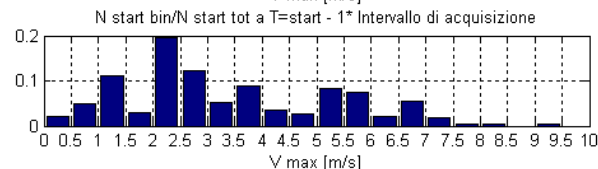
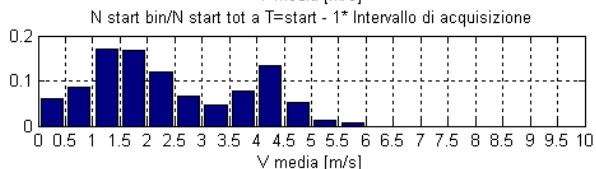
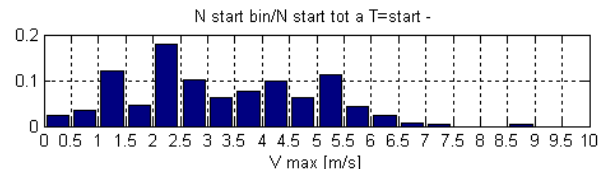
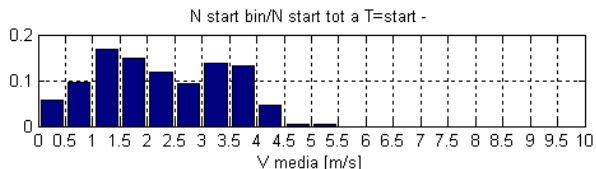
Studio delle condizioni di avviamento in sito



Condizioni ambientali corrispondenti ad eventi di avviamento con intervallo di acq.1min, AUTO DETECT (stazione cod.01, sp 12).

Conduzione delle indagini sperimentali e campagna di acquisizione

Studio delle condizioni di avviamento in sito



Condizioni ambientali corrispondenti ad eventi di avviamento con intervallo di acq.1min , TEMPO (stazione cod.01, sp 03).

Problematiche riscontrate nell'impiego di VAWT: esperienze a conclusione della ricerca

- **Produzione annua di energia:** le misure della risorsa in sito e la loro combinazione con dei modelli ideali di producibilità di VAWT hanno mostrato che il lavoro elettrico estraibile su base annua risulta essere confrontabile con i consumi medi domestici di un nucleo familiare.
- L'impiego di queste tecnologie va inserito in un **quadro di riduzione dei consumi elettrici** inteso come risparmio energetico a livello locale, presso le utenze. La micro generazione da fonte eolica si è dimostrata potere essere un **valido contributo alla riduzione dei consumi domestici**.
- Le misure in campo dei parametri di funzionamento dei prototipi realizzati mostrano che quanto predetto per condizioni ideali di funzionamento dai modelli prestazionali è, soprattutto in termini di curva di potenza della macchina, in accordo con quanto è stato ottenuto in sito con il vento reale.
- **Autoconsumi:** l'esperienza effettuata ha evidenziato la presenza di lunghi periodi di fermo macchina dovuti a condizioni di vento con velocità inferiore alla V_{cut-in} . In tali condizioni è indispensabile ridurre al massimo l'autoconsumo della macchina eolica, ed in particolare dei sistemi di controllo e di potenza. Tecnologie basate sulle logiche stand-by o di freezing devono essere applicate al fine di evitare bilanci energetici che, in alcuni casi, possono essere completamente sfavorevoli.
- **Sistemi di fissaggio:** è fondamentale sviluppare sistemi di fissaggio della struttura di supporto dell'aerogeneratore, tali da evitare la foratura della copertura. Questa banale osservazione in realtà sottopone due tematiche non trascurabili: forare una copertura spesso significa dovere lavorare, spesso con scarso successo, sull'impermeabilizzazione della copertura stessa ed inoltre, per edifici di non recente costruzione, sono sconosciute le proprietà del materiale sottostante. Si deduce quindi l'impossibilità di un efficace dimensionamento dei tasselli e degli ancoranti da utilizzare.

Problematiche riscontrate nell'impiego di VAWT: esperienze a conclusione della ricerca

▪ **Vibrazioni:** i VAWT rimangono comunque delle macchine rotanti che, in quanto non perfettamente bilanciate e soggette a carichi non stazionari, generano delle vibrazioni che vengono trasmesse dalla struttura di supporto alla struttura ospitante. Utilizzo di anti vibranti dell'intervallo di frequenza adeguato. V'è aggiunto l'associazione di una notevole quota delle vibrazioni generate al sistema di attuazione del generatore nel caso di macchine controllate in modo attivo,. Nei prototipi utilizzati per la ricerca infatti si sono sviluppati degli algoritmi di controllo che rendono "smooth" tutte la fasi di attuazione e di controllo.

▪ **Procedure di montaggio:** il montaggio di aerogeneratori sul tetto di edifici impone che i componenti del VAWT siano di peso e dimensioni non elevate, tali da permettere all'installatore una facile e sicura movimentazione, senza l'impiego di autogru. A tale scopo è stata sviluppata una procedura di montaggio che, mediante l'ausilio di appositi tools, soddisfa questi criteri.

▪ **Emissioni sonore:** devono essere contenute entro i limiti diurni e notturni fissati dalla normativa locale. Si è potuto accertare che un rotore ben progettato del tipo ad asse verticale consente di ottenere tali prestazioni.

▪ **Sicurezza:** operare in ambienti antropizzati significa operare in ambienti dove la probabilità di arrecare danni a beni di terzi e a terzi è molto elevata. Al fine di evitare collassi catastrofici della struttura, è indispensabile dotare l'aerogeneratore di più sistemi attivi indipendenti di sicurezza che rilevino eventuali anomalie sia di carattere elettrico che strutturale e impongano la messa in sicurezza della macchina. Le esperienze effettuate in galleria del vento e in campo hanno fatto riflettere sulla necessità assoluta dei temi della sicurezza. La macchina eolica non è un normale sistema di attuazione industriale che è possibile mettere in sicurezza attraverso l'interruzione dell'alimentazione, essa subisce in modo passivo una forzante dinamica che non è possibile arrestare. In situazioni di avaria si può giungere alle più catastrofiche conseguenze.

▪ **Percezione della sicurezza:** l'elevata velocità di rotazione degli aerogeneratori ad asse verticale di ridotte dimensioni produce una percezione del rischio crescente con l'aumentare della velocità di rotazione stessa. Indipendentemente dai fattori di sicurezza adottati e dalla affidabilità del prodotto, tale velocità deve essere tale da non creare un senso di pericolo, anche ingiustificato, da parte degli utilizzatori.

Contributo multimediale