

Una galleria del vento in campo aperto per il mini-eolico

Nel presente articolo viene presentata l'innovativa idea di testare, su scala reale, turbine eoliche di piccola e media taglia, in campo aperto, bypassando le gallerie del vento ed i loro problemi congeniti legati agli effetti di scala e di bordo. Un reticolo di ventilatori assiali che genera un flusso d'aria uniforme costituisce il cuore dell'idea. La progettazione si è resa possibile grazie ad accurate analisi CFD del flusso generato dai ventilatori, anche in presenza di disturbi atmosferici.

DESIGN OF A NOVEL OPEN SPACE TEST RIG FOR SMALL SCALE WIND TURBINES

In the present paper, an innovative open test rig for small and medium wind turbines is proposed. The goal is to develop a valid alternative to wind tunnels, which present unresolved problems, such as the unmatched Reynolds numbers for downscaled wind turbine tests. The core of the test bench is a cluster of axial fans, generating a uniform air flow. A thorough CFD analysis is performed for studying the flow generated by the fans, even in case of atmospheric disturbances.

INTRODUZIONE

La produzione di energia nel mondo sta mutando velocemente per far fronte alla necessità di ridurre le emissioni di gas serra e la dipendenza dalle fonti fossili [1,2]. Le fonti di energia rinnovabile sono diventate la base imprescindibile per lo sviluppo di sistemi energetici innovativi e sostenibili [3] e per offrire un futuro migliore a 4,5 miliardi di persone che oggi hanno un accesso limitato alle risorse energetiche, secondo quella che è anche la linea definita dai trattati internazionali sull'ambiente volti a ridurre l'inquinamento mondiale e il riscaldamento globale, come il Protocollo di Kyoto e la Strategia UE 2020 [4]. Non è dunque utopico pensare che, in un futuro davvero prossimo, la maggior parte delle industrie produrrà energia da fonti rinnovabili per uso proprio, abbinandola a sistemi di accumulo, per superare la discontinuità nella disponibilità di fonti rinnovabili [4].

Una delle strategie più promettenti ed utili consiste nell'impiego di turbine eoliche di piccola taglia, configurate in sistemi di rete decentralizzati [5,6]. Le turbine eoliche di piccola taglia, se adeguatamente dimensionate, possono essere una fonte di energia affidabile ed attrattiva. Grazie alle loro dimensioni ridotte e alle loro "attraenti" geometrie, le turbine eoliche di piccole e medie dimensioni si adattano meglio all'ambiente urbano ed in più sono caratterizzate da una velocità di cut-in decisamente inferiore a quelle proprie delle turbine di più grandi taglie, evidenziando la loro compatibilità con svariati scenari di applicazione. La maggior parte dello sviluppo dei concetti di progettazione per le moderne turbine eoliche è ottenuta mediante test in gallerie del vento chiuse. Questi test permettono la riproduzione di un'ampia gamma di condizioni del vento; tuttavia, in molti casi questo approccio sperimentale è ostacolato dalle grandi dimensioni delle turbine. Basti considerare che una turbina che genera energia dell'ordine di alcuni MW ha pale con diametro che supera i 50 m, mentre, mediamente, le sezioni trasversali delle gallerie del vento presentano dimensioni che non superano i 10 m. La necessità di testare un modello ridimensio-

nato opportunamente presenta un effetto collaterale di scala, dovuto al numero di Reynolds significativamente più piccolo del valore reale [7][8][9]. Inoltre, i gradienti presenti nello strato limite atmosferico, le variazioni della velocità e della direzione del vento, l'intensità della turbolenza, l'irregolarità della superficie terrestre e la stabilità termica, sono condizioni difficili da riprodurre fedelmente attraverso esperimenti in galleria del vento [10]. Per di più, le pareti della galleria del vento non consentono di riprodurre la caratteristica forma conica del flusso attorno al disco del rotore della turbina. Le pareti attorno alle turbine sono vincoli geometrici che perturbano la direzione delle linee del flusso. La maniera per evitare quest'ultimo inconveniente risiederebbe nel progettare la sezione di prova con dimensioni molto più grandi del diametro della turbina per riprodurre le condizioni in campo aperto. Va detto però che diversi studi sono stati condotti per risolvere i problemi relativi al numero di Reynolds per i test su turbine eoliche in scala nelle gallerie del vento. Makita e Sassa [11] hanno proposto poi l'utilizzo di un generatore di turbolenza in grado di indurre un certo grado di turbolenza nel flusso. Si utilizzano anche sistemi di griglie attivi per regolare l'intensità della turbolenza nel tentativo di minimizzare l'errore sul numero di Reynolds [12] [13].

Piuttosto che concentrarsi sul miglioramento delle gallerie del vento per superare i limiti menzionati precedentemente, questo articolo propone un metodo innovativo per il testing di turbine eoliche che consiste nell'utilizzare un test-bench a basso costo ed in campo aperto. Ad oggi, la letteratura scientifica non ha evidenziato gallerie del vento in grado di riprodurre le condizioni in campo aperto. Pertanto, il compito appare impegnativo ma, allo stesso tempo, può rappresentare una grande innovazione nel campo del testing di turbine eoliche.

Rispetto ai sistemi convenzionali la soluzione proposta può abbattere i costi di installazione ed i tempi per la progettazione delle strutture. Infatti, una tipica galleria del vento, oltre a consistere in un condotto convergente seguito da uno divergente, prevede l'installazione di venti-

latori, nidi d'ape e altri canali per indirizzare l'aria. Inoltre, le tipiche gallerie del vento sono solitamente caratterizzate da lunghezze che possono raggiungere anche i 30 m [14,15].

Il vantaggio principale e la vera innovazione della soluzione proposta vanno però ricercati nella possibilità di testare rotori in scala reale, analizzando l'effetto reale dell'ambiente circostante e di tutti i fenomeni associati, quali l'interazione con un vento reale, gli effetti di turbolenza e le condizioni atmosferiche, senza la presenza di un indesiderato effetto-scala [16]. In più, si eviterebbe, come confermato da [17,18], qualsiasi tipo di effetto di bloccaggio, ovvero la potenza della turbina non sarebbe influenzata da alcun aumento di velocità dovuto alle pareti della galleria del vento.

Tale sistema è stato realizzato all'interno di una rete di laboratori denominata Lab-ZERO "Zero Emission Research Option", oggetto di un progetto finanziato da Politecnico di Bari e Regione Puglia incentrato sulla produzione, la conversione e la gestione dell'energia ottenuta da fonti rinnovabili, oltre che sulla promozione dello sviluppo di Smart-Grid all'interno del contesto "Smart-City". Il Lab-ZERO è anche dotato di un impianto di cogenerazione di calore e energia elettrica [19-22] che brucia biomassa solida ricavata da residui di potatura (nella logica di un'economia circolare della zona) [23], progettato per fornire energia a tutte le strutture che lo compongono.

Nel presente lavoro, accurate simulazioni fluidodinamiche 3D hanno permesso di valutare le caratteristiche del flusso generato dai ventilatori, in termini di uniformità e intensità, così come la sua interazione con l'ambiente esterno. Tale analisi numerica risultata fondamentale sia nella determinazione del diametro massimo del rotore che può essere testato, sia nella definizione della corretta posizione nella quale la turbina eolica deve essere collocata all'interno del campo di prova.

METODOLOGIA

Descrizione della galleria del vento a campo aperto

La Figura 1-a mostra una foto della galleria del vento in campo aperto,

realizzata nell'ottobre 2016. Il campo di prova sperimentale coinvolge un'area di 40 m² sita all'interno del Politecnico di Bari. Come mostrato nella Figura 1-a, essa risulta esser collocata in campo aperto senza alcun tipo di ostacolo e di impedimento urbano.

La galleria del vento a campo aperto si adatta senza problemi al testing di turbine eoliche sia ad asse orizzontale che verticale. Essa è costituita da una torre eolica dotata di un reticolo di 49 ventilatori assiali, posizionata a 7 m dal suolo che è progettata per indirizzare un flusso d'aria regolabile verso una turbina eolica posizionata di fronte ad essa, ad una distanza regolabile per mezzo di un'apposita guida. Il concetto generale può essere applicato a diverse situazioni, a condizione che le caratteristiche del gruppo di ventilatori assiali (numero di ventilatori e dimensioni) siano adatte all'ingombro delle turbine da testare.

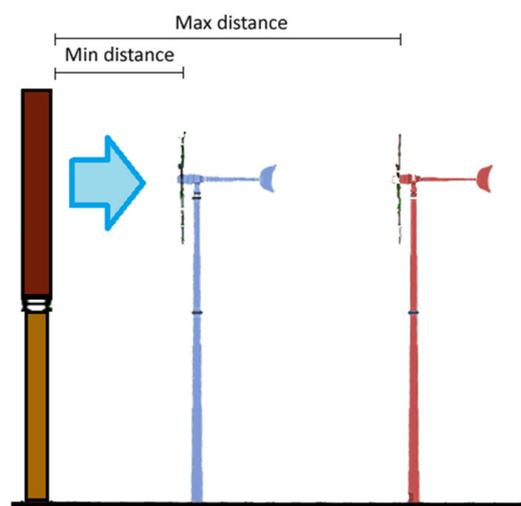
Va detto che il flusso d'aria prodotto dai ventilatori appena dopo la sezione di uscita di questi non può essere considerato uniforme e, pertanto, i valori non trascurabili di vorticità del flusso a ridosso della matrice di ventilatori, potrebbero non essere adatti per testare la turbina in condizioni uniformi. Allo stesso modo, se la turbina dovesse essere posizionata ad una distanza eccessiva dalla matrice dei ventilatori l'uniformità del "vento" generato dai ventilatori potrebbe essere compromessa dall'interazione con il vento naturale, la cui direzione difficilmente risulterà allineata con quella di prova. Ne deriva l'esistenza di un intervallo spaziale ottimo, all'interno del quale, dato lo stabilirsi di condizioni di funzionamento sufficientemente uniformi, è possibile posizionare la turbina da testare, così come mostrato in Figura 1-b.

Pertanto, ci si è avvalsi della fluidodinamica computazionale per caratterizzare il campo di velocità generato dai ventilatori, al fine di valutare la minima e la massima distanza dai ventilatori a cui deve essere posizionata la turbina, insieme al suo diametro massimo. Per raggiungere questo obiettivo, è stato prima di tutto analizzato il flusso generato dalla rotazione di un singolo ventilatore, al fine di studiare l'evoluzione delle componenti tangenziali della velocità generate dal movimento del ventilatore; in seguito è stata studiata l'influenza di un

FIGURA 1 - Galleria del vento in campo aperto costruita presso il Politecnico di Bari (a). Definizione del range spaziale di prova ottimale all'interno del quale collocare la turbina (b)



a



b

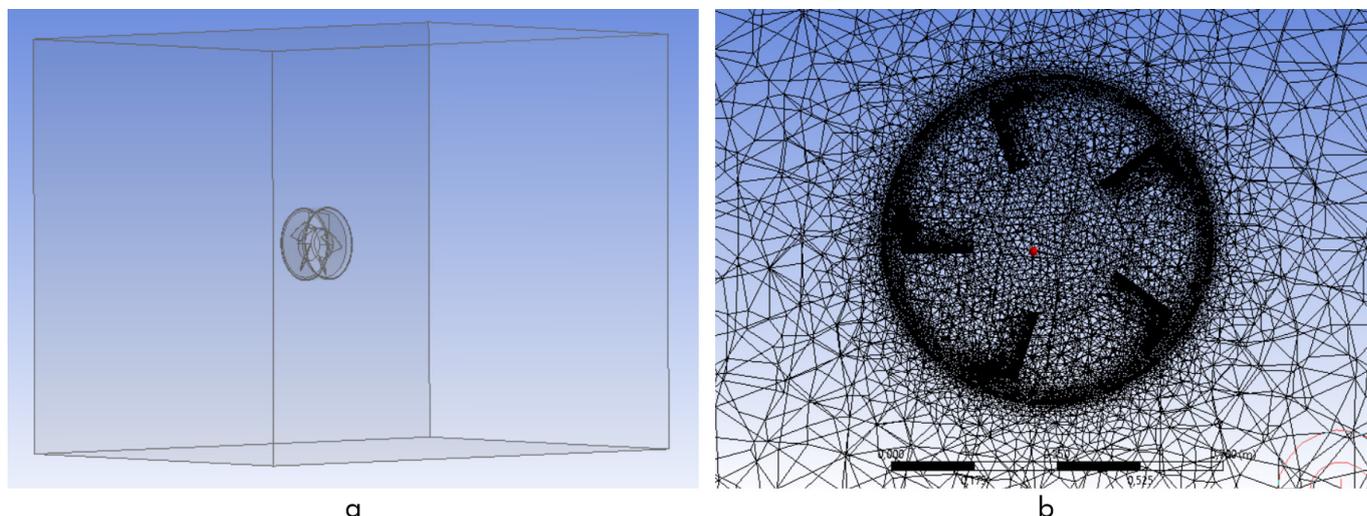


FIGURA 2 - Dominio geometrico impiegato nell'analisi CFD del flusso generato da un singolo ventilatore(a). Dettaglio della mesh mobile in prossimità del ventilatore (ricavato su una sezione trasversale del dominio computazionale) (b)

vento laterale che soffia ortogonalmente rispetto alla direzione assiale di prova, simulando l'intera matrice di ventilatori, per semplicità, in condizioni stazionarie. L'analisi è stata eseguita mediante il codice di calcolo commerciale ANSYS FLUENT-17.1. Per le simulazioni sono state risolte le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili, utilizzando una modellistica RANS con modello di turbolenza $k-\epsilon$. È stato inoltre adottato un risolutore basato sulla pressione, con uno schema accurato al secondo ordine nello spazio e nel tempo.

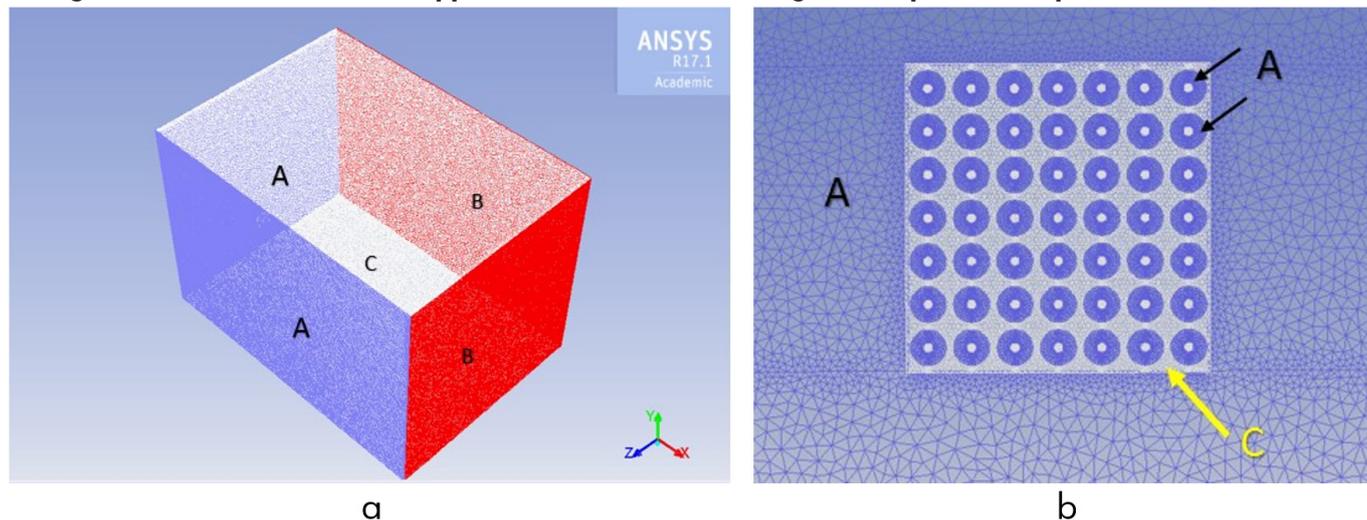
DOMINIO DI CALCOLO E CONDIZIONI AL CONTERNO

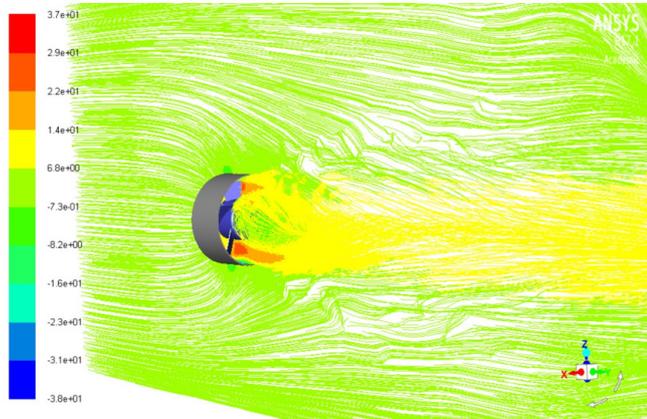
Il dominio computazionale utilizzato per valutare il campo di flusso generato da un singolo ventilatore è mostrato in Figura 2-a. La Figura 2-b offre una visione più dettagliata della mesh nell'intorno del ventilatore. La griglia è composta da circa 1,5 milioni di elementi. La superficie

di uscita del dominio si trova a 6 metri dalla sezione di uscita del ventilatore. Si è realizzata una mesh rotante per simulare la dinamica del ventilatore a 1400 giri/min. Una pressione pari a 1 bar è stata impostata su ciascun bordo (non solido) del dominio computazionale. Un time-step pari a 0,0043 s è stato sufficiente a garantire una soluzione stabile e accurata. Per raggiungere condizioni statisticamente periodiche, è stato necessario completare 400 time-steps (caratterizzati da 500 iterazioni ciascuno).

Per quanto concerne la seconda simulazione, il dominio computazionale è costituito da un parallelepipedo avente dimensioni 70x45x70 m, nelle direzioni x, y e z, rispettivamente (si veda Figura 3). Al fine di rispettare l'architettura del progetto reale della galleria del vento aperta realizzata presso il Politecnico di Bari, il gruppo di ventilatori è stato posizionato a 7 metri dalla superficie rappresentante il suolo. Le

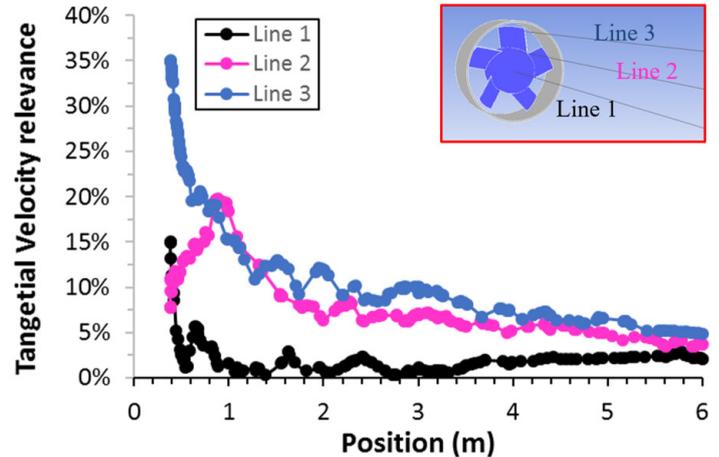
FIGURA 3 - Dominio computazionale e condizioni al contorno adottati nelle simulazioni sull'influenza di vento laterale che soffia secondo la direzione Z. A: sezioni di ingresso; B: sezioni di uscita; C: pareti solide. In (b) un dettaglio del reticolo di ventilatori appartenente alla sezione di ingresso A, parallela al piano YZ





Pathlines Colored by Y Velocity (m/s)

a



Position (m)

b

FIGURA 4 - Stream-line del flusso generato da un singolo ventilatore dopo 400 time-steps(a), colorate secondo il modulo della velocità assiale, espresso in m/s. Nel grafico (b) è plottata la frazione percentuale della componente tangenziale, calcolata rispetto alla componente assiale della velocità e monitorata su 3 linee di controllo, definite a partire dalla sezione di uscita del ventilatore, così come mostrato nell'angolo in alto a destra della figura

superfici contrassegnate con la lettera A nella Figura 3-a indicano le due sezioni di ingresso: una contiene il reticolo di ventilatori e quindi le sezioni anulari attraversate dalle portate generate da ogni ventilatore, mentre l'altra è la superficie laterale dal quale il vento naturale soffia perpendicolarmente alla direzione del flusso generato dai ventilatori. Le superfici etichettate con la lettera B rappresentano invece i confini di uscita. Le superfici indicate con C sono pareti solide, mentre la superficie superiore è stata modellata utilizzando una condizione "free-shear". Nelle sezioni anulari di ingresso è stata imposta una velocità assiale di 12 m/s, mentre una velocità di 0,5 m/s è stata imposta nei punti rimanenti appartenenti alla superficie che contiene la matrice di ventilatori. Uno studio dell'intensità del vento nella regione Puglia ha portato alla considerazione che una velocità nel range $3,5 \div 5$ m/s può rappresentare un'ipotesi ragionevole per la velocità del vento naturale entrante dalla sezione trasversale al reticolo di ventilatori. In particolare, una velocità massima di 4 m/s, allineata con la direzione z della Figura 3-a, è stata imposta come condizione al contorno per quantificare il disturbo esterno dovuto all'interazione con il vento naturale.

RISULTATI NUMERICI

Analisi del flusso generato da un singolo ventilatore

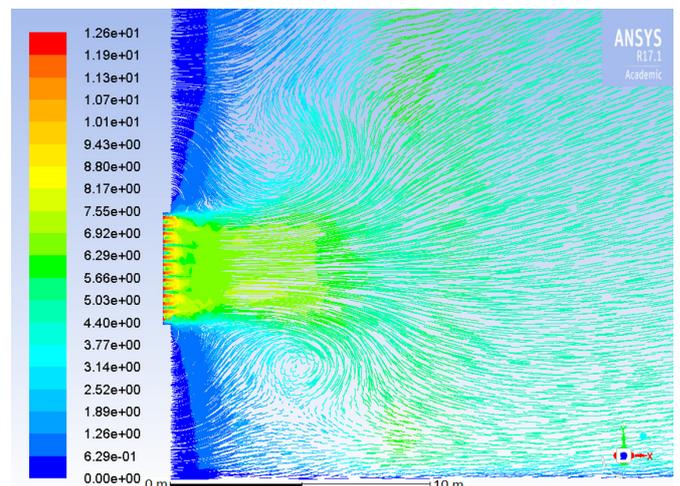
Nella Figura 4-a sono raffigurate le linee di flusso ottenute dalle simulazioni numeriche relative alla rotazione di un singolo ventilatore. In tale figura la scala di colori fornisce indicazioni sul modulo della velocità assiale. Le velocità più basse sono registrate vicino l'asse centrale del rotore, mentre in prossimità della punta delle pale la componente tangenziale diventa rilevante. Considerando le distribuzioni di velocità lungo tre linee di controllo mostrate in Figura 4-b, è possibile osservare che l'entità della velocità tangenziale, calcolata come frazione percentuale del suo modulo rispetto a quello della componente assiale, assume valori elevati subito dopo la sezione di uscita dal ventilatore, per poi diminuire gradualmente, fino a diventare inferiore al 10%, ad una distanza di circa 2,5 m. Questa analisi preliminare porta alla conclusione che la velocità del flusso generato da un singolo ventilatore

assume un profilo assimilabile ad una condizione quasi unidimensionale, essendosi estinti quasi del tutto i moti vorticosi generati dalla rotazione delle pale del ventilatore, ad una distanza non inferiore a 2,5 m dai ventilatori.

Analisi del flusso generato dal gruppo di ventilatori

La Figura 5 mostra la distribuzione del campo di velocità ottenuto nelle simulazioni che hanno interessato l'intero reticolo di ventilatori, in presenza di un disturbo dovuto ad un vento naturale. Quel che appare evidente è che dopo circa 6 m dall'ingresso, si osserva un progressivo decadimento della componente assiale della velocità. Questi risultati evidenziano quanto sia importante avere una stima accurata della distanza massima a cui può essere collocata una turbina all'interno del campo di prova.

FIGURA 5 - Stream-line nel piano XY, colorate secondo il modulo della velocità assiale (m/s), in presenza di un disturbo laterale



ANSYS
117.3
Academic

Allo scopo di comprendere come il vento laterale influenzi il flusso di campo, è stato considerato un coefficiente di prestazione adimensionale. Questo parametro è definito "deviation angle" (Dev%) ed è calcolato come il rapporto percentuale tra le componenti di velocità lungo z e x (secondo l'orientazione degli assi in Figura 3-a). I risultati numerici dicono che per una distanza inferiore ai 4.7 m, tale parametro non supera mai il valore soglia critico del 10%. Tale valore va dunque interpretato come la distanza massima alla quale la turbina deve essere posizionata in caso di un vento laterale che soffi a 4 m/s. In questo caso, oltre questa distanza limite, la componente laterale della velocità diventerebbe troppo importante, ostacolando così il corretto testing di una turbina eolica. In generale, l'obiettivo di questa analisi è quello di poter definire una procedura od un criterio atto a valutare la posizione ottimale per la turbina (che può essere mossa tramite le opportune guide) in condizioni di prova differenti, evidenziando l'adattabilità del metodo di prova qui proposto.

Infine, le previsioni dello studio CFD sono state utilizzate per la determinazione del diametro massimo del rotore della turbina che può essere testato per le particolari dimensioni del reticolo di ventilatori realizzato presso il Politecnico di Bari. A tale scopo, è stato definito il parametro $\delta\%$, denominato "Overlap Factor". Esso viene calcolato come la variazione percentuale della velocità assiale locale, rispetto al valore massimo valutato nel dominio di calcolo, vale a dire:

$$\delta\% = \frac{V_{max} - V_i}{V_{max}} \cdot 100.$$

Scegliendo un "Overlap Factor" pari al 10% come valore di soglia, si trova che, una turbina posta a 2,5 m dal cluster, dovrebbe avere un diametro massimo del suo rotore non superiore a 4,6 m.

CONCLUSIONI

Nel presente articolo si è descritta una nuova strategia di testing a basso costo per turbine eoliche, sia ad asse orizzontale che verticale, di piccola e media taglia, basata su una galleria del vento in campo aperto. L'idea innovativa è quella di sfruttare un reticolo di 49 ventilatori assiali, posizionato a 7 m dal suolo, per produrre un flusso d'aria uniforme in ambiente aperto, evitando così di incorrere in quei fenomeni indesiderati che si verificano nelle gallerie del vento. All'interno del campo di prova sperimentale, la turbina eolica viene posizionata davanti ai ventilatori e la sua posizione può essere regolata attraverso l'uso di una guida scorrevole. Questa idea di testing offre una grande flessibilità nelle indagini sperimentali, in quanto è anche possibile regolare la velocità del "vento" generato, consentendo così di testare turbine eoliche in diverse condizioni operative.

Per mezzo di accurate simulazioni numeriche tridimensionali, è stata dimostrata la fattibilità del sistema. Per prima cosa, tramite simulazioni non stazionarie, è stato analizzato il flusso generato da un singolo ventilatore rotante, al fine di studiare accuratamente la vorticità generata dal movimento del ventilatore ed i risultati hanno mostrato che, per il reticolo di ventilatori realizzato presso il Politecnico di Bari, il flusso d'aria fornito dai ventilatori può essere considerato approssimativamente unidimensionale a partire da una distanza di 2,5 metri. In seguito, è stata studiata l'influenza sul campo di velocità di un vento laterale "naturale" che soffi in direzione ortogonale rispetto alla direzione assiale dei ventilatori. Per realizzare

ciò si è simulato l'intera matrice di ventilatori in condizioni stazionarie ed i risultati hanno evidenziato che la stima della distanza massima a cui la turbina può essere posizionata gioca un ruolo cruciale. In particolare, nel caso di un vento che soffi alla velocità di 4 m/s, si è riscontrato che 4,7 m è la distanza non oltre la quale conviene posizionare la turbina. Si è verificato poi che, per la struttura costruita presso il Politecnico di Bari, il campo di prova ottimale si ha se la turbina eolica presenta un diametro massimo del rotore non superiore a 4,6 m. In generale, in questo lavoro, si è fornita un'indicazione sulla modalità con cui definire il range spaziale all'interno del quale è possibile testare una turbina eolica, in condizioni sufficientemente uniformi, all'interno della galleria del vento in campo aperto proposta.

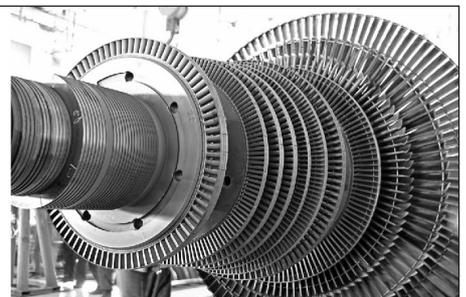
RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato supportato dalla "Regione Puglia" tramite il contratto "Progetto Reti di laboratori pubblici di ricerca APQ Ricerca Scientifica - Il atto integrativo Fase A - (DGR n.92 del 27/11/2007) - intitolato: Laboratorio per lo sviluppo delle fonti rinnovabili e dell'efficienza nei distretti energetici: progetto zero (Zero Emission Research Option) ".

BIBLIOGRAFIA

1. Amirante R, Distaso E, Di Iorio S, Sementa P, Tamburrano P, Vaglieco BM, et al. Effects of Natural Gas Composition on Performance and Regulated, Greenhouse Gas and Particulate Emissions in Spark-Ignition Engines. *Energy Convers Manag* 2017;143:338-47.
2. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P, Reitz RD. Measured and Predicted Soot Particle Emissions from Natural Gas Engines. *SAE Tech Pap* 2015-24-2518 2015. doi:doi:10.4271/2015-24-2518.
3. Amirante R, Coratella C, Distaso E, Tamburrano P. A small size combined system for the production of energy from renewable sources and unconventional fuels. *Energy Procedia* 2015;81:240-248. doi:10.1016/j.egypro.2015.12.090.
4. Amirante R, Cassone E, Distaso E, Tamburrano P. Overview on recent developments in energy storage: Mechanical, electrochemical and hydrogen technologies. *Energy Convers Manag* 2017;132:372-87. doi:10.1016/j.enconman.2016.11.046.
5. Tummala A, Velamati RK, Sinha DK, Indrajya V, Krishna VH. A review on small scale wind turbines. *Renew Sustain Energy Rev* 2016;56:1351-71. doi:10.1016/j.rser.2015.12.027.
6. Wang C, Prinn RG. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms. *Atmos Chem Phys Discuss* 2009;9:19081-102. doi:10.5194/acpd-9-19081-2009.
7. Cho T, Kim C. Wind tunnel test for the NREL phase VI rotor with 2m diameter. *Renew Energy* 2014;65:265-74. doi:10.1016/j.renene.2013.10.009.
8. Cho T, Kim C. Wind tunnel test results for a 2/4.5 scale MEXICO rotor. *Renew Energy* 2012;42:152-6. doi:10.1016/j.renene.2011.08.031.
9. Schepers JG, Boorsma K, Cho T, Gomez-iradi S, Schaffarczyk P, Jeromin A, et al. Final report of IEA Task 29, Mexnext (Phase 1): Analysis of Mexico wind tunnel measurements 2012:312.
10. Iungo GV. Experimental characterization of wind turbine wakes: Wind tunnel tests and wind LiDAR measurements. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2016;149:35-9. doi:10.1016/j.jweia.2015.11.009.

11. Makita H, Sassa K. Active turbulence generation in a laboratory wind tunnel. *Adv. Turbul.* 3, Springer; 1991, p. 497–505.
12. Talavera M, Shu F. Experimental study of turbulence intensity influence on wind turbine performance and wake recovery in a low-speed wind tunnel. *Renew Energy* 2017.
13. Qing'an L, Kamada Y, Maeda T, Murata J, Nishida Y. Effect of turbulent inflows on airfoil performance for a Horizontal Axis Wind Turbine at low Reynolds numbers (Part II: Dynamic pressure measurement). *Energy* 2016;112:574–87.
14. Bottasso CL, Campagnolo F, Petrovic V. Wind tunnel testing of scaled wind turbine models: Beyond aerodynamics. *J Wind Eng Ind Aerodyn* 2014;127:11–28. doi:10.1016/j.jweia.2014.01.009.
15. Schümann H, Pierella F, Sætran L. Experimental investigation of wind turbine wakes in the wind tunnel. *Energy Procedia* 2013;35:285–96. doi:10.1016/j.egypro.2013.07.181.
16. Amirante R, De Palma P, Distaso E, La Scala M, Tamburrano P. Design of a novel open space test rig for small scale wind turbine. *Energy Procedia* 2017;126:628–35.
17. Bai CJ, Wang WC. Review of computational and experimental approaches to analysis of aerodynamic performance in horizontal-axis wind turbines (HAWTs). *Renew Sustain Energy Rev* 2016;63:506–19. doi:10.1016/j.rser.2016.05.078.
18. Chen TY, Liou LR. Blockage corrections in wind tunnel tests of small horizontal-axis wind turbines. *Exp Therm Fluid Sci* 2011;35:565–9. doi:10.1016/j.expthermflusci.2010.12.005.
19. Amirante R, De Palma P, Distaso E, Pantaleo AM, Tamburrano P. Thermodynamic analysis of a small scale combined cycle for energy generation from carbon neutral biomass. *Energy Procedia*, vol. 129, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.09.213.
20. Amirante R, De Palma P, Distaso E, La Scala M, Tamburrano P. Experimental prototype development and performance analysis of a small-scale combined cycle for energy generation from biomass. *Energy Procedia*, vol. 126, 2017. doi:10.1016/j.egypro.2017.08.294.
21. Amirante R, Distaso E, Tamburrano P. Novel, cost-effective configurations of combined power plants for small-scale cogeneration from biomass: Design of the immersed particle heat exchanger. *Energy Convers Manag* 2017;148:876–94. doi:10.1016/j.enconman.2017.06.047.
22. Amirante R, De Palma P, Distaso E, Tamburrano P. Thermodynamic analysis of small-scale externally fired gas turbines and combined cycles using turbo-compound components for energy generation from solid biomass. *Energy Convers Manag* 2018;166. doi:10.1016/j.enconman.2018.04.055.
23. Amirante R, Clodoveo ML, Distaso E, Ruggiero F, Tamburrano P. A tri-generation plant fuelled with olive tree pruning residues in Apulia: An energetic and economic analysis. *Renew Energy* 2016;89:411–21.



CONSULENZA DI INGEGNERIA DI ALTO LIVELLO
per affrontare le sfide di un mondo energetico
in rapida evoluzione
Dall'ideazione alla messa in servizio dell'impianto



ENGINEERING SERVICES FOR ENERGY
Corso Magenta 85 / 20123, Milano - Italy
Tel +39 02 428797 - Fax +39 02 42297576
esesrl@esesrl.com