

MILANO

di Riccardo Oldani

STUDIA IL VENTO

Una lunga tradizione di ricerca sugli elicotteri e la possibilità di utilizzare una delle più grandi e attrezzate gallerie del vento d'Europa. Sono questi, insieme alla preparazione dei ricercatori, i principali ingredienti che fanno del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale del Politecnico di Milano con il suo laboratorio POLI-Wind uno dei più importanti centri di ricerca

sull'eolico in Europa. A dirigerlo è Carlo Bottasso, con una lunga esperienza di ricerca sia nella meccanica del volo e nelle sue applicazioni per gli elicotteri, sia nel progetto, sviluppo e modellizzazione delle turbine eoliche. WindEnergy è andata a scoprire quali sono i progetti di ricerca condotti dal pool di ricercatori coordinato da Bottasso, che annovera docenti di ruolo oltre a numerosi dottorandi e studenti,

spesso coinvolti in progetti finanziati da imprese private. I punti di forza di questa struttura e del pool di ricerca sono molti. Innanzi tutto il dipartimento vanta una lunga esperienza nella modellistica applicata agli elicotteri, dalla meccanica del volo alla progettazione di rotori. «Lo studio delle pale dei rotori degli elicotteri – dice Bottasso – ci ha portati a sviluppare già da diversi decenni competenze



LA GALLERIA DEL VENTO del Politecnico di Milano

Uno degli strumenti più importanti a disposizione dei ricercatori del Politecnico di Milano è la galleria del vento, che ha caratteristiche uniche al mondo. Diversamente dalla maggior parte delle strutture di questo tipo, è impostata su uno schema ad anello verticale, in cui due camere di prova sono poste una sopra l'altra. Le due camere sono diverse: una più piccola da 4x4 m, con un flusso da 55 m/s e bassissimi livelli di turbolenza dell'aria, e una più grande da 14x4 m di dimensioni con un flusso da 14 m/s, nella quale è possibile approssimare la turbolenza ed il profilo verticale di velocità che è presente nella bassa atmosfera terrestre. Le diverse caratteristiche delle due camere di prova conferiscono al laboratorio doti uniche di flessibilità d'impiego, come testimoniato dalle molte e diverse prove qui condotte dalla realizzazione dell'impianto. Le due camere sono attrezzate con strutture che consentono di fissare i campioni in prova anche vari strumenti di rilevamento e misura. La camera più piccola è montata su un cuscinio d'aria e può essere spostata dalla sua sede e rimpiazzata con una gemella. Per mezzo di questa soluzione, mentre si conduce un esperimento se ne può allestire un altro nella camera non utilizzata, in modo da ottimizzare i tempi. I dati raccolti nelle camere sono poi indirizzati ed elaborati in una camera di controllo attrezzata.

IL DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA AEROSPAZIALE DEL POLITECNICO DI MILANO È UNO DEI CENTRI D'ECCELLENZA DELLA RICERCA SULL'EOLICO IN ITALIA. QUI UN NUTRITO E PREPARATISSIMO STAFF, COORDINATO DAL PROFESSOR CARLO BOTTASSO, LAVORA ALLO SVILUPPO DI TECNOLOGIE E METODI DI INDAGINE CON INTERESSANTI RICADUTE INDUSTRIALI, DALLA MODELLISTICA ALLA PROGETTAZIONE DI AEROGENERATORI.



utili anche allo sviluppo delle pale eoliche: i fenomeni fisici in gioco non sono esattamente gli stessi, ma gli aspetti in comune sono comunque molti. Non solo, l'esperienza nel campo elicotteristico unita all'eolico ci ha consentito di sviluppare una preparazione multidisciplinare unica nel suo genere».

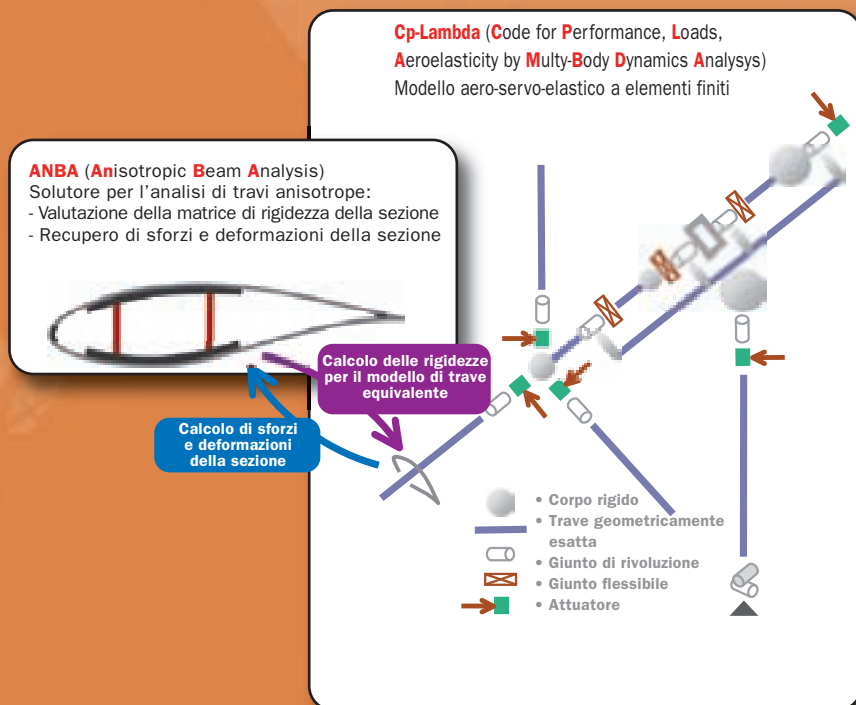
Oltre al valore del corpo di ricercatori e docenti, il dipartimento si avvale poi della galleria del vento del Politecnico

di Milano, anch'essa con caratteristiche molto particolari (vedi il box).

La galleria consente test di vario genere, su modelli di velivoli ad ala fissa e rotante, edifici, ponti, treni, barche a vela oltre che per applicazioni sportive quali il ciclismo, il bob e lo sci, e si presta particolarmente per le valutazioni sulle turbine eoliche, in scala oppure a dimensioni reali se si tratta di microgeneratori. «Sono numerose le aziende, anche stranie-

re, per le quali i ricercatori di diversi Dipartimenti del Politecnico di Milano conducono prove nella nostra struttura per i problemi più disparati – dice Bottasso – anche nell'ambito di importanti contratti europei. E non mancano le applicazioni eoliche, sia con modelli in scala di macchine di taglia multi-MW, che per i produttori di piccoli generatori che vengono qui per definire le curve di potenza dei loro prodotti».





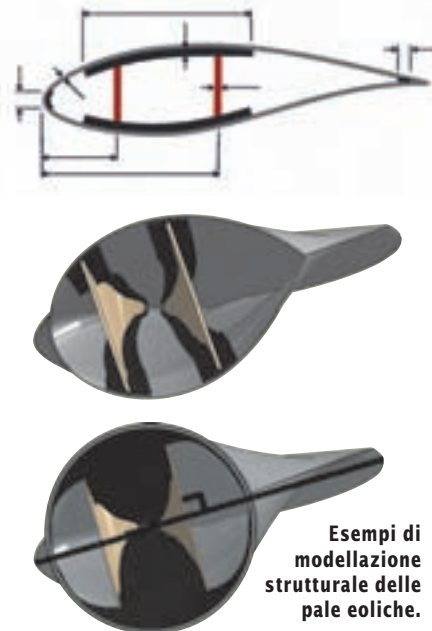
MODELLI AERO-SERVO-ELASTICI

L'attività di ricerca sull'eolico condotta dal Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale spazia su vari settori. Un primo ambito è quello della simulazione "aero-servo-elastica" degli aerogeneratori, un termine che sta a indicare modelli matematici che rappresentano il comportamento aerodinamico, le strutture con la loro deformabilità, gli attuatori che governano la macchina e gli effetti di mutua interazione fra questi tre aspetti. Modelli di questo tipo servono a molteplici scopi quali la stima dei carichi necessari al dimensionamento della macchina e dei suoi componenti, alla verifica della stabilità e del livello vibratorio di bordo, oltre che alla messa a punto delle leggi di controllo. «Il nostro gruppo di ricerca ha sviluppato un sistema completo di simulazione – spiega Bottasso – che nasce da un codice simile sviluppato per gli elicotteri, modificato ed espanso per riprodurre tutte le condizioni operative e di vento necessarie per l'analisi di turbine eoliche. Il codice, denominato Cp-Lambda, contempla un'ampia libreria di elementi tipici di un aerogeneratore e permette di creare un modello virtuale estremamente dettagliato della macchina. Con i sistemi tradizionali, la model-

lazione è spesso semplificata. Un esempio di applicazione? Alessandro Croce, un ricercatore del gruppo ed il responsabile dello sviluppo del codice, cita il lavoro fatto per un produttore italiano che aveva bisogno di valutare a livello teorico le performance di un generatore mineolico dotato di un sistema di ribaltamento del rotore, utilizzato per proteggere la macchina in presenza di venti elevati. «Molti dei codici di simulazione esistenti – spiega – non avrebbe consentito di modellare accuratamente il sistema di ribaltamento, che ovviamente costituisce un elemento cruciale per una macchina di questo tipo, cosa che invece è possibile con il nostro software. Il codice si avvale anche di un modello di trave molto sofisticato, che permette di tenere in conto vari effetti normalmente trascurati da codici più tradizionali, quali la deformabilità della pala a torsione e taglio, e gli accoppiamenti dovuti all'uso dei materiali compositi nella progettazione della pala. Tali modelli sono una novità in campo eolico e acquisteranno sempre maggiore importanza con il crescere delle dimensioni dei nuovi aerogeneratori, ma sono disponibili da più di 15 anni nel settore elicotteristico ed il dipartimento ha tratto quindi grande vantaggio dalla sua tradizione di studi.

PROGETTAZIONE DEGLI AEROGENERATORI

Dall'esperienza sviluppata con il suo codice di analisi e simulazione, i ricercatori di POLI-Wind hanno anche messo a punto un potente strumento di progettazione degli aerogeneratori, denominato Cp-Max. Progettare una pala eolica è un lavoro complesso e lungo, che deve tenere conto di moltissimi fattori, come l'aerodinamica, l'aero-elasticità, la resistenza delle strutture, la scelta dei materiali, ed altri ancora. «Per questo scopo – dice Bottasso – abbiamo scritto un codice che tenta di automatizzare il più possibile il processo: in sostanza il sistema consente di definire un modello, lancia le simulazioni di funzionamento in tutte le condizioni operative previste dalle norme, individua le modifiche da fare e consente di apportarle in tempi rapidi e propone in definitiva una soluzione ottimale. È chiaro che il sistema ha comunque bisogno di progettisti esperti



IMPIEGO DI NUOVI MATERIALI

Uno di questi è lo studio degli effetti causati da modifiche o variazioni nell'impiego dei materiali in una pala eolica, per verificare, per esempio, se è possibile ottenere una riduzione dei carichi. «Nel mio lavoro – dice Carlo Tibaldi, uno degli studenti impegnati nel progetto – sto studiando come un diverso allineamento delle fibre dei materiali compositi impiegati consenta di ottenere una diversa risposta al vento. Per esempio, abbiamo visto che accoppiare opportunamente la

Dinamica della progettazione

Quattro fasi di lavoro

- Generatore
- Attuatori
- Freni
- ...

- Controllo in passo e coppia
- **Regolazione** della macchina secondo le condizioni del vento
- Reazione alle **raffiche**
- Reazioni al **vento turbolento**
- Mantenimento del carico di lavoro sugli attuatori entro limiti ammissibili
- Gestione dei **transitori**: procedure di avvio, di normale spegnimento o di emergenza



- Energia annua prodotta (**AEP: Annual Energy Production**)
- Rumore
- ...

- **Carichi** massimi calcolati in base a condizioni di carico (DLCs: Design Load Cases) secondo normativa IEC-61400
- **Fatica**, analisi di Rainflow per calcolo danneggiamento equivalente (DELS: Damage Equivalent Loads)
- Massima deflessione della pala
- Calcolo delle condizioni di **risonanza**
- **Stabilità**
- **Accoppiamento** dinamica rotore/generatore/torre/fondazione (incluso il caso offshore)
- **Peso**: massa, materiali compositi
- **Vincoli** tecnologici e produttivi

apportare delle varianti, come per esempio modificare le caratteristiche dei materiali compositi utilizzati su indicazione del fornitore degli stessi, è stato possibile con il codice Cp-Max

aggiornare il dimensionamento strutturale della pala in un paio di giorni, che è un tempo estremamente ridotto rispetto agli standard di progettazioni di questo genere. Questo strumento è l'esempio di come una risorsa nata con obiettivi di studio e di

e con le opportune competenze – aggiunge Bottasso – ma il suo uso rende più agevole ed efficace il lavoro della squadra di progetto, che quindi può esplorare in modo più completo le soluzioni disponibili per giungere a definire la macchina migliore possibile.»

I vantaggi in termini di tempo sono notevoli, come è stato dimostrato nella progettazione di una pala da 45 m di lunghezza recentemente completata dal gruppo di lavoro del Politecnico per un'azienda italiana. Nel corso del progetto, ogni volta che è stato necessario

ricerca si sia trasformata in una soluzione adatta a un ambiente industriale. Su questi filoni di lavoro del Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale si è poi innestato lo sviluppo di aspetti complementari e di corollario, ma non per questo meno importanti.

flessione con la torsione della pala, consente di ridurre i carichi del vento sulla stessa ». Si va sempre di più, insomma, verso la progettazione di strutture "intelligenti" delle turbine, dove ogni singola pala si adatta alle condizioni del vento che incontra. La capacità di analisi e la potenza degli strumenti messi a punto dal gruppo consente di generare in maniera del tutto automatica modelli CAD 3D della pala e di effettuare analisi ad elementi finiti, il che permette ai progettisti di conoscere nel dettaglio lo stato di sforzo e deformazione in tutti i punti della pala nelle condizioni operative più estreme.

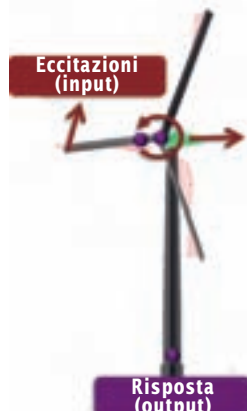
ANALISI DI STABILITÀ E IDENTIFICAZIONE DELLE PROPRIETÀ

Un'ulteriore evoluzione degli strumenti messi a punto dal gruppo POLI-Wind riguarda la soluzione di un problema sempre più attuale e importante per l'industria eolica e cioè quello di verificare la stabilità aero-elastica di un aerogeneratore e il suo comportamento vibratorio. L'insorgere di instabilità può infatti portare a rotture catastrofiche, mentre comportamenti eccessivamente vibratorii portano a riduzioni della vita a fatica della macchina. «Oggi – spiega il dottorando Stefano Cacciola – si tende a progettare aerogeneratori di dimensioni sempre più

grandi, con potenze oltre i 7 e fino a 10 MW. Si tratta di macchine di dimensioni enormi, per cui diventa fondamentale disporre di modelli di simulazione affidabili che consentano di verificare il progetto in ogni condizione d'uso prima della realizzazione di un prototipo. Su dimensioni più piccole degli aerogeneratori il problema non era così assillante: si tendeva a progettare in modo "generoso", sovradimensionando certe caratteristiche per mettersi al sicuro. A causa di ciò la stabilità aero-elastica delle pale è stata raramente un problema fino al giorno d'oggi. Ma con il crescere delle dimensioni questo approccio non è più possibile: occorre calibrare la progettazione per evitare da un lato sprechi e dall'altro rischi.»

C'è anche un aspetto diametralmente opposto a quello della progettazione e cioè la verifica che il prodotto finito rispetti al 100% i parametri definiti in sede di progetto. Questo controllo è essenziale per essere sicuri che il prodotto finale o i prototipi abbiano tutte le caratteristiche definite a livello teorico. Per rispondere a questa esigenza il gruppo ha messo a punto delle procedure di test apposite. Sottoponendo la pala ad una serie di misure in laboratorio, un software sviluppato da POLI-Wind in collaborazione con il National Renewable Energy Laboratory (NREL) negli USA, permette di determinare quali siano le effettive caratteristiche strutturali di una pala, e di verificarne quindi la corrispondenza con le specifiche di progetto. >>>

Calcolo delle perdite di stabilità in un rotore da 7MW



FIUTARE IL VENTO PER PRODURRE DI PIÙ

A tutti questi strumenti di analisi e modellizzazione minuziosa delle turbine eoliche si aggiunge un ulteriore filone di ricerca che segna la nuova frontiera del settore. Gli aerogeneratori di domani, infatti, saranno in grado di "fiutare" il vento, di prevederne le caratteristiche e variazioni prima ancora che giunga a contatto con le pale. Queste a loro volta potranno cambiare assetto per adattarsi al vento in arrivo e sfruttarlo nel migliore dei modi. Com'è possibile tutto questo?

«Innanzitutto imparando a ottimizzare il movimento di ciascuna pala per rispondere al vento - dice Bottasso - e in futuro montando superfici mobili sulle pale per migliorarne ulteriormente la capacità di adattarsi alle condizioni di vento locale ed istantaneo». Su rotori di diametro anche superiore ai 100 metri come quelli che si stanno progettando oggi, e quelli ancora più grandi in fase di sviluppo da parte di molte aziende, le condizioni di ventosità variano notevolmente all'interno dell'area spazzata dal rotore.

Le macchine moderne sono dotate di un anemometro in navicella che però fornisce solo un valore medio del vento. Per avere dati più precisi, una soluzione estremamente promettente è costituita dal Lidar (Laser Imaging Detection and Ranging) che è in grado di effettuare una misurazione del fronte di vento in arrivo sul rotore diverse decine di metri prima dell'aerogeneratore.

I ricercatori di POLI-Wind collaborano con l'Università di Aalborg in Danimarca per studiare come sfruttare i dati raccolti da un Lidar per variare l'assetto delle singole pale - in funzione del vento in arrivo, per esempio muovendo in anticipo il passo per ridurre i carichi durante una raffica.

Il gruppo sta sviluppando ulteriori soluzioni originali al problema di meglio conoscere il vento incidente su un rotore. «L'idea - dice Carlo Riboldi, un dottorando impegnato sul progetto - è utilizzare dei sensori, per esempio accelerometri e sensori di carico sulle pale per capire quale vento stia soffiando sulla macchina. In sostanza in questo modo trasformiamo l'intero rotore in un enorme sensore del vento, capace per esempio di percepire la direzione d'arrivo e adattare di conseguenza il profilo delle pale per consentire all'aerogeneratore di rendere al meglio».

SPERIMENTAZIONE IN GALLERIA DEL VENTO

A tutta questa serie di servizi e di settori di ricerca si aggiunge quello che è forse il fiore all'occhiello di tutta l'attività del gruppo. I ricercatori del Politecnico milanese hanno infatti messo a punto tutta una serie di tecnologie e metodi per creare modelli in scala dei generatori eolici in grado di riprodurre in tutto e per tutto, in galleria del vento, i comportamenti delle turbine reali. Si tratta di uno sforzo molto complesso, avviato nell'ambito di una collaborazione con il gruppo Vestas e sulla sua turbina V90. «Questo progetto è estremamente ambizioso - spiega ancora Bottasso - Non si tratta di realizzare un modello che riproduca in scala il solo comportamento aerodinamico di un aerogeneratore, come già fatto sia qui al Politecnico nel recente passato che da altri gruppi nel mondo.

Piuttosto, stiamo tentando per la prima volta di realizzare un modello aero-elastico, che rappresenti in scala ridotta il comportamento aerodinamico e strutturale della macchina vera, e che sia anche capace di svolgere tutte le funzioni di un vero aerogeneratore e quindi con un suo sistema di controllo». La riduzione in scala delle dimensioni implica la scalatura anche della massa e della rigidità della struttura, che devono anch'esse esse-

re ridotte secondo precise regole. Si pensi che una pala lunga 50 metri, ridotta nelle sue dimensioni di 45 volte deve pesare solo 70 grammi per obbedire alle leggi di scalatura. Come realizzare le pale con le giuste caratteristiche di peso e rigidità è un problema che ha necessitato delle competenze di diversi docenti e ricercatori del Politecnico per giungere ad una soluzione pratica e realizzabile. E poi c'è il problema più importante, quello del numero di Reynolds, che indica il rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosive che entrano in gioco nel momento in cui il vento interagisce con le pale dell'aerogeneratore. «In galleria del vento - spiega Filippo Campagnolo, dottorando e dipendente Vestas, e responsabile del progetto nell'ambito del gruppo POLI-Wind - il numero di Reynolds è molto più piccolo rispetto alla realtà» e questo significa che in galleria si verificano fenomeni e interazioni diverse rispetto alla realtà. La vera sfida per i ricercatori milanesi è stata quindi di trovare soluzioni per ridurre il più possibile queste discrepanze. I ricercatori stanno cercando soluzioni sempre più efficaci per riprodurre in scala gli stessi comportamenti dell'aerogeneratore in dimensioni reali e, dopo tre anni di lavoro, sono quasi arrivati al traguardo. Sono attese proprio nelle prossime settimane alcune prove in galleria

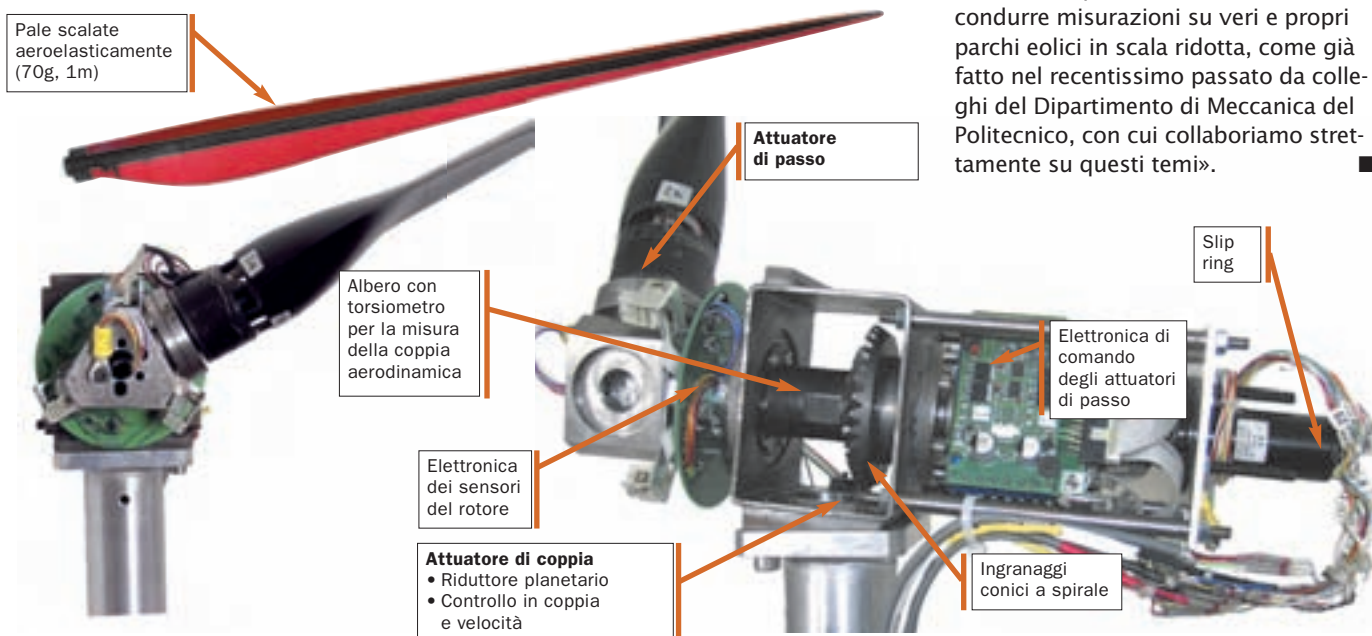


Gli schemi mostrano la sezione della galleria del vento del Politecnico di Milano e la camera impiegata per i test sui modelli in scala di generatori eolici.

del vento che daranno indicazioni importanti sulla qualità del lavoro svolto. «Il pieno successo di questa operazione sarebbe per noi un risultato molto significativo – dice Bottasso – che ci permetterebbe di riprodurre in galleria del vento una serie di situazioni praticamente impossibili da ottenere su un prototipo al vero, quali molte delle con-

dizioni estreme e di emergenza prescritte dalle norme di progettazione di queste macchine. Abbiamo in programma di effettuare prove sulle leggi di controllo, in modo più agevole e a costi più bassi che non su di una vera macchina, e di studiare i carichi su di un aerogeneratore posto nella scia di un altro più a monte, come avviene in un

parco eolico. Potremo perfino effettuare misurazioni in scia, per capire nel dettaglio come un rotore influisce sulla velocità e turbolenza dell'aria a valle. Questi studi sono fondamentali anche per capire la disposizione delle turbine nei parchi eolici e quindi per ottimizzare la produzione di un'intera windfarm. Le dimensioni della galleria del vento di Milano ci permettono tra l'altro di condurre misurazioni su veri e propri parchi eolici in scala ridotta, come già fatto nel recentissimo passato da colleghi del Dipartimento di Meccanica del Politecnico, con cui collaboriamo strettamente su questi temi».



**LA TECNOLOGIA RENDE
L'ENERGIA EOLICA IL MOTORE DI
UN BUSINESS SOSTENIBILE.**

4 – 8 aprile 2011 · Hannover · Germany

- Scoprite le tendenze e le innovazioni dei settori **impianti, componenti e servizi per l'energia eolica** - anche attraverso argomenti cruciali come ripotenziamento, offshoring e integrazione nelle strutture decentrate di approvvigionamento.
- Cogliete anche i preziosi impulsi dei campi tematici affini, come **tecnologia degli azionamenti, subfornitura industriale e automazione.**
- Maggiori informazioni sull'evento tecnologico più importante al mondo sul sito: **hannovermesse.com**



GET NEW TECHNOLOGY FIRST