

## ABSTRACT

Il presente lavoro si pone come obiettivo principale quello di mettere a punto e validare una metodologia sperimentale per lo studio in galleria del vento di modelli in scala di turbine eoliche per installazioni offshore.

Le motivazioni di tale studio sono da ricercarsi all'interno dello scenario, in continua evoluzione, delle energie rinnovabili e in particolare dell'energia eolica. Ormai da alcuni decenni, infatti, a fronte della sempre crescente domanda di energia da parte della popolazione, si è cercato di sfruttare l'energia proveniente dal vento per la produzione di energia elettrica attraverso l'installazione di parchi eolici. L'esigenza di sostenere una richiesta energetica sempre crescente, unita alla necessità di preservare la società civile dall'inquinamento visivo e acustico, strettamente correlati al funzionamento delle turbine eoliche stesse, ha recentemente indotto la comunità scientifica internazionale a prendere in considerazione l'installazione "offshore" di tali parchi eolici, quindi in mare, lontano dalla costa. Attualmente questi impianti sono situati in acque non particolarmente profonde e pertanto non sufficientemente lontani dalla costa da risolvere a pieno le problematiche accennate; essi sono inoltre composti da turbine eoliche aventi le tipiche caratteristiche dei prototipi utilizzati sulla terraferma, nonostante siano sostanzialmente diverse le condizioni ambientali legate all'installazione in mare.

E' evidente, pertanto, che solo con l'ulteriore aumento della distanza di installazione dalla costa si riesca non solo ad incrementare la produzione di energia elettrica, viste le caratteristiche eoliche più favorevoli rispetto all'offshore attualmente inteso, ma anche a risolvere a pieno le problematiche che inevitabilmente queste macchine comportano. Tuttavia, aumentare considerevolmente la distanza dalla costa significa anche incrementare la profondità del fondale, pertanto si deve necessariamente abbandonare l'adozione di piattaforme fisse, su cui attualmente sono installate le turbine eoliche offshore a breve distanza dalla costa, principalmente per ragioni economiche

correlate alla resa dei singoli generatori, che non è tale da giustificare i notevoli costi legati alle suddette piattaforme fisse, adottate invece comunemente ad esempio in ambito petrolifero.

Molteplici sono le proposte avanzate dalla comunità scientifica per quanto riguarda la progettazione di piattaforme galleggianti destinate all'installazione offshore di turbine eoliche: esse differiscono tra loro per tipologia di base galleggiante, sistema di ormeggio e dimensione.

L'incremento della distanza di installazione dalla costa è inoltre combinata alla necessità di migliorare l'efficienza della macchina offshore in relazione alle condizioni di esercizio decisamente più critiche rispetto allo stato dell'attuale offshore; questo richiede il passaggio attraverso la definizione di strumenti progettuali dedicati: è evidente, infatti, la necessità di considerare le specificità del sito di installazione e considerare, in fase progettuale, i relativi carichi agenti sugli organi della macchina, la dinamica connessa ai sistemi galleggianti, l'usura correlata alla criticità dell'ambiente marino e il dimensionamento a fatica degli organi della macchina. Al fine della corretta definizione degli stati di sforzo sulla macchina e dell'ottimizzazione dei sistemi di controllo per la massimizzazione di produzione elettrica, è necessario definire dei modelli di simulazione numerica che forniscano il forzamento dinamico indotto dall'interazione vento-struttura e onda-struttura, anche in relazione alle diverse tipologie di piattaforme galleggianti e quindi di ormeggio.

La validazione dei modelli numerici può essere condotta attraverso campagne di misura al vero su turbine eoliche installate o in virtù dei risultati sperimentali raccolti su modelli in scala in vasche navali e presso gallerie del vento.

E' necessario sottolineare il fatto che le misure al vero portano con sé tutte le problematiche relative alla difficoltà di interpretare in modo univoco i dati a causa dei complessi fenomeni fisici legati al funzionamento reale di tali macchine, che inevitabilmente affliggono le acquisizioni mascherando considerevolmente i segnali ingegneristicamente utili e rendendo difficile l'estrapolazione delle informazioni utilizzabili a fini progettuali; per quanto riguarda, invece, lo studio di modelli in scala di turbine eoliche "galleggianti" in vasche navali, alla fedele riproduzione sperimentale dell'interazione idrodinamica della piattaforma galleggiante si affianca però un difficile controllo

sulla qualità del vento incidente generato che generalmente è affidato solo a grandi ventilatori. Al contrario lo studio di tali sistemi presso strutture quali gallerie del vento, è combinato alla conoscenza esatta dei parametri caratterizzanti il flusso di vento incidente sulla turbina, con la possibilità di correlare le condizioni di vento, completamente conosciute e controllate, con i risultati relativi ai carichi in gioco e alla produzione elettrica del modello in scala, rilevati dalla strumentazione sperimentale.

Ne consegue la necessità di disporre di un sistema sperimentale in grado di riprodurre, in scala, le condizioni di esercizio cui sono soggette tali turbine eoliche offshore, tenendo pertanto conto della dinamica del galleggiamento connesso alle piattaforme e del carico eolico incidente.

Sebbene gli studi sulla fattibilità tecnica dell'installazione di turbine eoliche su piattaforme galleggianti siano decisamente recenti, tuttavia la letteratura scientifica è abbastanza ricca per quanto riguarda l'aspetto numerico e lo sviluppo di sofisticati codici di calcolo; è però altrettanto evidente la mancanza di uno scenario sperimentale consolidato a livello internazionale.

Il lavoro di tesi presentato consiste nella progettazione, nella realizzazione e nella validazione sperimentale di un meccanismo a 2 gradi di libertà sul quale è possibile installare un modello di turbina eolica opportunamente strumentato, per la rivelazione delle forze, per lo studio della dinamica del generatore e per mettere in correlazione la dinamica dell'intero sistema con la produzione di energia elettrica. Tale meccanismo, installato all'interno della camera di prova della galleria del vento, è azionato mediante due attuatori idraulici, uno per ciascun grado di libertà, in modo da poter studiare diverse condizioni di galleggiamento, definite grazie all'opportuno controllo degli azionamenti stessi; in base al tipo di fissaggio del modello sul meccanismo è inoltre possibile studiare diverse configurazioni sperimentali. L'intero sistema è inoltre installato su una piattaforma rotante in grado di cambiare l'angolo relativo rispetto alla direzione di incidenza del vento generato dalla galleria, a sua volta variabile a seconda delle esigenze sperimentali. In questo lavoro è stata inoltre predisposta la procedura di controllo per eseguire una movimentazione del meccanismo di simulazione del moto ondoso in tempo reale, coerentemente con i carichi aerodinamici e

idrodinamici istantaneamente agenti sulla macchina e sulla piattaforma; questo conferisce all'apparato sperimentale la capacità di testare specifiche condizioni ambientali cui è soggetta una turbina eolica offshore, a valle della definizione di un particolare stato del mare e di un determinato regime eolico. Durante le prove sperimentali, pertanto, la storia temporale del sistema di movimentazione risulta definita a valle del calcolo numerico "in linea" connesso all'interazione fluido-struttura relativa alla parte di piattaforma immersa in acqua e attraverso l'elaborazione e la retroazione dei segnali di forza misurati in tempo reale mediante la strumentazione, indici della resistenza aerodinamica offerta dal modello durante il funzionamento. La scelta di progettare, presso la galleria del vento del Politecnico di Milano, il suddetto sistema di movimentazione meccanico di tipo "hardware-in-the-loop", che riproduca la dinamica delle onde combinato alla generazione di un forzamento eolico completamente controllato, è coerente con la volontà di dare risalto allo studio degli aspetti aerodinamici strettamente legati alla qualità nella generazione di potenza elettrica.

La validazione dell'intero sistema ha coinvolto delle prove di movimentazione in condizioni dinamiche differenti, la messa a punto del sistema di acquisizione, l'elaborazione dei segnali di forza acquisiti e la progettazione dell'algoritmo per i calcoli idrodinamici, il tutto strutturato in un sistema strumentale che permetta il funzionamento "real-time" dell'impianto : durante queste fasi è stato preso in considerazione un modello rigido di turbina eolica opportunamente scalato da un prototipo esistente (scala 1/25).

Tale apparato sperimentale si presta anche allo studio di modelli di turbine eoliche scalate aero-elasticamente, per studi specifici su determinati aspetti quali la taratura e la validazione di modelli numerici sofisticati o per lo studio preventivo di turbine eoliche già destinate all'installazione presso siti definiti, di cui si conoscono a priori le condizioni ambientali locali e di esercizio.

Lo sviluppo futuro di questo lavoro dovrà necessariamente mirare al miglioramento e all'ottimizzazione dell'impianto sperimentale presentato, in modo tale da fornire una metodologia di riferimento per la progettazione di turbine eoliche offshore e dei suoi componenti.