



POLITECNICO
MILANO 1863

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Aeronautica

**Analisi di aerogeneratori *offshore*
attraverso co-simulazione tramite
codici aero-servo-idro-elastici**

Relatore:

Prof. Alessandro CROCE

Tesi di Laurea di:

Matteo STRADA

Matricola: 837320

Anno Accademico: 2015/2016

Ringraziamenti

Prima di presentare il testo della tesi vorrei prendermi qualche riga per ringraziare di cuore tutti coloro che hanno contribuito al raggiungimento di questo traguardo.

Ringrazio innanzitutto il Professor Alessandro Croce, relatore della tesi, senza la cui guida sapiente non sarebbe stato possibile svolgere questo lavoro.

Ringrazio gli Ingegneri Luca Sartori e Carlo Riboldi, che hanno saputo offrirmi il loro supporto durante questo percorso.

Ringrazio la mia famiglia; i miei genitori, Mario e Maria, che mi hanno sempre sostenuto credendo in me e spronandomi di giorno in giorno. Li ringrazio per avermi reso possibile di essere quello che sono. Ringrazio mio fratello Andrea, al quale ora passo il testimone di allievo di Ingegneria del Politecnico e a cui auguro i migliori successi. Ringrazio i miei nonni, Tonino e Angela, che continuano a rendermi la vita *dolcissima*.

Ringrazio amorevolmente Melissa per essere sempre al mio fianco, per il conforto nei momenti di difficoltà e per la dolcezza di ogni attimo passato insieme.

So che questo mio traguardo vi riempie di orgoglio. Per questo ho dato tutto me stesso.

Ringrazio inoltre tutti i miei amici, coloro con cui sono cresciuto, i miei *fratelli* della vita, che mi hanno permesso di “staccare la spina” quando ne avevo bisogno.

Ringrazio anche tutte le altre persone che mi sono state vicino, tra cui i miei zii e cugini, i miei amici e colleghi con cui ho condiviso il percorso universitario.

Infine, un pensiero rivolto a me stesso. L'impegno che ho messo per raggiungere questo obiettivo è stato tanto. Le difficoltà che ho affrontato sono state molte. Ma se mi guardo indietro sorrido, perché ciò ha accresciuto in me la certezza di avere il futuro dalla mia parte.

Indice

Indice delle figure	iii
Indice delle tabelle	vi
Sommario	vii
Abstract	viii
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	1
1.1. Il progetto “OC3”	3
1.2. Obiettivi della tesi	5
CAPITOLO 2 DEFINIZIONE DEL PROBLEMA.....	7
2.1. Strumenti utilizzati	7
2.1.1. Cp-Lambda	7
2.1.2. FAST	10
2.1.3. PoliWindController	16
2.2. Strategia di utilizzo degli strumenti.....	20
CAPITOLO 3 MODELLAZIONE E CONTROLLO	22
3.1. Modello NREL 5MW	22
3.1.1. Proprietà generali macchina	23
3.1.2. Pala	23
3.1.3. Hub e navicella	27
3.1.4. Generatore e albero motore	29
3.1.5. Struttura di supporto.....	29
3.2. Validazione modello NREL 5MW	31
3.2.1. Frequenze proprie	31
3.2.2. Diagramma di Campbell	32
3.2.3. Curve C_p - λ	33
3.3. Controllo.....	35
3.3.1. Controllo di un aerogeneratore.....	35
3.3.2. Impostazione del sistema di controllo	38
CAPITOLO 4 VALIDAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO.....	42
4.1. Utilizzo di PoliWindController con FAST	42
4.2. Simulazioni NWP (Normal Wind Profile)	44
4.2.1. Valutazione dello schema di controllo	46

4.2.2. Confronto modelli FAST – Cp-Lambda.....	50
4.3. DLC 1.5.....	56
CAPITOLO 5 STUDIO DELL'ACCOPIAMENTO Cp-Lambda – FAST	59
5.1. Strategia di impiego dei codici	59
5.1.1. FAST.....	60
5.1.2. Cp-Lambda	63
5.1.3. Linker.....	65
5.2. Modifiche apportate ai codici	68
5.2.1. Modifiche al codice FAST.....	68
5.2.2. Modello Cp-Lambda	75
5.3. Considerazioni sui modelli.....	82
CAPITOLO 6 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI	86
Bibliografia	90
APPENDICE A Modello 5 MW Cp-Lambda.....	A-1
A.1. Proprietà generali macchina	A-1
A.2. Pala.....	A-1
A.3. Hub e navicella	A-6
A.4. Generatore e albero motore.....	A-7
A.5. Struttura di supporto	A-7
APPENDICE B Validazione modello NREL 5MW	B-1
B.1. Frequenze proprie.....	B-1
B.2. Diagramma di Campbell	B-3
B.3. Curve $C_p-\lambda$	B-5
APPENDICE C Tabelle riferite allo swap array.....	C-1
C.1. Cinematica piattaforma.....	C-1
C.2. Carichi piattaforma.....	C-1

Indice delle figure

Figura 1 - Produttività energetica cumulativa delle diverse fonti nel corso dell'ultimo decennio.....	1
Figura 2 - Installazioni annuali di impianti di produzione di energia eolica nell'ultimo decennio.....	2
Figura 3 - Strutture di supporto utilizzate nelle diverse fasi del progetto OC3 [1].....	4
Figura 4 - Schema topologico HAWT in Cp-Lambda [2].....	9
Figura 5 - GDL modello FAST [3].....	11
Figura 6 - Architettura di FAST [4].....	13
Figura 7 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom [4].....	15
Figura 8 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore floating [4].....	15
Figura 9 - Logica di controllo dello stato operativo del Supervisor.....	18
Figura 10 - Andamento della distribuzione di massa per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.....	24
Figura 11(a,b) - Andamento della distribuzione delle inerzie a flappeggio(a) e ritardo(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.....	25
Figura 12(a,b) - Andamento della distribuzione delle rigidità a flappeggio(a) e ritardo(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.....	25
Figura 13(a,b) - Andamento della distribuzione delle rigidità assiale(a) e torsionale(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.....	26
Figura 14 - Distribuzione di corda in funzione dell'apertura della pala con riferimento all'asse della pala e posizione del centro aerodinamico di ciascuna sezione.....	27
Figura 15(a,b) - (a) Posizione del centro aerodinamico di ciascuna sezione; (b) Distribuzione dello svergolamento in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.....	27
Figura 16 - Schematizzazione del gruppo rotore-navicella [3].....	28
Figura 17 - Confronto diagramma di Campbell del modello onshore con forzanti.....	32
Figura 18 - Curve $C_p-\lambda$ con vento assiale.....	33
Figura 19 - Curve $C_p-\lambda$ con vento orizzontale di 11.4 m/s.....	34
Figura 20 - Curve $C_p-\lambda$ con vento orizzontale di 11.4 m/s (Pala irrigidita a torsione).....	35
Figura 21 - Regione II e regione III.....	36
Figura 22(a,b) - (a) Regione II, regione II ½ e regione III; (b) Traiettorie di regolazione in caso di presenza del vincolo di tipo acustico.....	37
Figura 23(a,b) - Confronto tra il controllo effettuato in assenza (linea blu) e in presenza (linea rossa) del vincolo sulla tip speed: (a) Ω , β e coppia al variare della velocità del vento; (b) traiettoria di regolazione del passo pala nella curva $C_p-\lambda$	37
Figura 24 - Traiettorie di regolazione – Curva $T_e-\Omega$ [7].....	38
Figura 25(a,b) - (a) Modello ridotto; (b) Punti di trim sulla traiettoria di regolazione.....	40
Figura 26 - Normal Wind Profile con vento di 11 m/s riferito all'altezza dell'hub di 90 metri.....	44
Figura 27(a,b) - Componenti x(a) e z(b) della velocità delle particelle di fluido a differenti profondità.....	45

Figura 28 - NWP 7 m/s: regione II. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore	46
Figura 29 - NWP 11 m/s: regione II½. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore	46
Figura 30 - NWP 15 m/s: regione III. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore	47
Figura 31 - NWP 23 m/s: regione III. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore	47
Figura 32(a,b) - Differenze percentuali di velocità di rotazione del rotore(a) e passo pala(b) tra FAST e Cp-Lambda	48
Figura 33(a,b) - Differenze percentuali di velocità di rotazione del rotore(a) e passo pala(b) tra FAST e Cp-Lambda (Pala del modello Cp-Lambda irrigidita a torsione).....	49
Figura 34 - NWP - Curva di potenza	49
Figura 35 - NWP - Differenze percentuali di potenza erogata tra FAST e Cp-Lambda	50
Figura 36 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di ritardo in radice pala	51
Figura 37 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di flappeggio in radice pala.....	51
Figura 38 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di rollio della piattaforma	52
Figura 39 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di beccheggio della piattaforma	52
Figura 40 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di rollio a base monopile	53
Figura 41 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di beccheggio a base monopile	53
Figura 42 - NWP – Differenze percentuali dei valori medi dei momenti flettenti.....	54
Figura 43 - NWP – Differenze percentuali delle deviazioni standard dei momenti flettenti	54
Figura 44 - EOG ₁ con vento di riferimento pari a 11 m/s	56
Figura 45 - DLC 1.5 11 m/s. Storia temporale della velocità del vento che investe l’hub con perdita del controllo.....	57
Figura 46 - DLC 1.5 11 m/s. Velocità di rotazione del rotore e passo pala	57
Figura 47 - DLC 1.5 11 m/s. Potenza aerodinamica del rotore e potenza elettrica.....	58
Figura 48 - DLC 1.5 11 m/s. Momento flettente in radice pala a ritardo e flappeggio.....	58
Figura 49 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom [8]	60
Figura 50 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom: HydroDyn e SubDyn	61
Figura 51 - Gradi di libertà della piattaforma nel sistema di riferimento inerziale FAST	62
Figura 52 - Raffigurazione del flusso di dati tra i due modelli aero-servo-elastico e idro-elastico [8].....	62
Figura 53 - Schema di accoppiamento Cp-Lambda - FAST tramite linker [7]	66
Figura 54 - Schema funzionale della simulazione Cp-Lambda – FAST	67
Figura 55 - Raffigurazione del flusso di dati in FAST_red.exe.....	70
Figura 56 - Spostamento Fore-Aft e verticale della piattaforma: input per FAST_red.exe ...	70

Figura 57 - Rotazione a rollio e beccheggio della piattaforma: input per FAST_red.exe	71
Figura 58 - Forza in direzione Fore-Aft e verticale sulla piattaforma: confronto output	71
Figura 59 - Momento di rollio e di beccheggio della piattaforma: confronto output	72
Figura 60 - Schema funzionale della simulazione in parallelo Cp-Lambda – FAST	74
Figura 61(a,b) - (a) Carico verticale applicato; (b) Valore della rigidità della molla	75
Figura 62 - Spostamento Fore-Aft e verticale della piattaforma: input per FAST_red.exe ...	77
Figura 63 - Rotazione a rollio e beccheggio della piattaforma: input per FAST_red.exe	77
Figura 64 - Forza in direzione Fore-Aft e verticale sulla piattaforma: confronto output	78
Figura 65 - Momento di rollio e di beccheggio della piattaforma: confronto output	78
Figura 66 - Differenze percentuali tra valori medi degli input e degli output per FAST_red.exe.....	79
Figura 67 - Confronto Cp-Lambda: dinamica Fore-Aft della piattaforma.....	81
Figura 68 - Confronto Cp-Lambda: dinamica Side-Side della piattaforma	81
Figura 69 - Confronto Cp-Lambda: dinamica della piattaforma relativa all'asse torre	81
Figura 70 - Schema funzionale della co-simulazione Cp-Lambda – FAST. Richiamo FAST_DLL.dll da Cp-Lambda	84
Figura 71 - Confronto diagramma di Campbell	B-4
Figura 72 - Confronto diagramma di Campbell con forzanti	B-4
Figura 73 - Confronto diagramma di Campbell Onshore-Offshore	B-5
Figura 74 - Confronto diagramma di Campbell Onshore-Offshore con forzanti	B-5
Figura 75 - Storia temporale Cp	B-6
Figura 76 - Curve $C_p-\lambda$ con vento assiale	B-7
Figura 77 - Curve $C_p-\lambda$ con vento orizzontale di 11.4 m/s	B-8
Figura 78 - Curve $C_p-\lambda$ con vento orizzontale di 11.4 m/s. Pala irrigidita a torsione.....	B-9

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Misure scritte dal codice aeroelastico nello swap array e relative posizioni.....	17
Tabella 2 - Comandi scritti dal Controller nello swap array e relative posizioni	17
Tabella 3 - Alcuni dei parametri generali e relativa posizione nello swap array	17
Tabella 4 - Stati operativi dettati dal Supervisor	18
Tabella 5 - Proprietà generali NREL 5MW Baseline Wind Turbine	23
Tabella 6 - Proprietà generali pala	23
Tabella 7 - Proprietà hub e navicella	28
Tabella 8 - Proprietà generatore e albero motore	29
Tabella 9 - Proprietà torre land-based	30
Tabella 10 - Proprietà struttura di supporto per applicazione offshore	30
Tabella 11 - Frequenze pala isolata [Hz].....	31
Tabella 12 - Frequenze torre con tip mass [Hz].....	32
Tabella 13 - Confronto valori curve $C_p-\lambda$ – Caso vento assiale.....	33
Tabella 14 - Stati LQR	39
Tabella 15 - Input LQR	39
Tabella 16 - Input e Output di HydroDyn e SubDyn	63
Tabella 17 - Descrizione giunti Cp-Lambda	64
Tabella 18 - Parametro che descrive lo stato della simulazione e sua posizione nello swap array	73
Tabella 19 - Proprietà generali NREL 5-MW Baseline Wind Turbine.....	A-1
Tabella 20 - Proprietà generali pala	A-2
Tabella 21 - Proprietà hub e navicella	A-6
Tabella 22 - Proprietà generatore e albero motore	A-7
Tabella 23 - Proprietà torre per applicazione land-based	A-8
Tabella 24 - Proprietà struttura di supporto per applicazione offshore	A-9
Tabella 25 - Frequenze pala isolata [Hz].....	B-2
Tabella 26 - Frequenze torre senza tip mass [Hz]	B-2
Tabella 27 - Frequenze torre con tip mass [Hz].....	B-3
Tabella 28 - Confronto valori curve $C_p-\lambda$ – Caso vento assiale.....	B-7
Tabella 29 - Confronto valori curve $C_p-\lambda$ – Caso vento orizzontale.....	B-8
Tabella 30 - Confronto valori curve $C_p-\lambda$ – Caso vento orizzontale con pala irrigidita a torsione	B-9
Tabella 31 - Misure scritte dal codice aeroelastico nello swap array e relative posizioni....	C-1
Tabella 32 - Output della DLL di FAST e relative posizioni nello swap array	C-2

Sommario

Il presente elaborato di tesi ha come obiettivo lo svolgimento di una analisi di aerogeneratori per applicazioni *offshore*. A tal fine si rende necessario lo sviluppo di strumenti in grado di prevederne la risposta dinamica.

La prima parte del lavoro è dedicata alla presentazione degli strumenti di cui si dispone all'inizio dell'attività, ovvero i codici aeroelastici *Cp-Lambda* e *FAST* e il codice di controllo *PoliWindController*. Si spiegherà la strategia che verrà messa in atto per raggiungere l'obiettivo di realizzare un unico strumento in grado di racchiudere le caratteristiche dei due codici di simulazione.

La seconda parte dell'elaborato è focalizzata sulla descrizione del modello di aerogeneratore da 5 MW sviluppato dalla *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) nei suoi studi in campo sia *onshore* che *offshore* che verrà utilizzato nel corso della tesi. Verrà presentato inoltre il setup del sistema di controllo per la macchina in questione insieme alla sua validazione tramite simulazioni dinamiche in ambiente *offshore* effettuate con entrambi i codici.

L'ultima parte del lavoro tratta lo studio dell'accoppiamento tra *Cp-Lambda* e *FAST*. Verranno esposte dettagliatamente le modifiche necessarie da apportare ai codici e riportate alcune prove che avranno lo scopo di indagarne la validità.

Alla fine dell'elaborato vengono riepilogati i risultati ottenuti durante il percorso della tesi evidenziando gli obiettivi raggiunti. Verranno inoltre proposti gli sviluppi necessari a rendere il codice oggetto di studio un valido strumento per raggiungere l'obiettivo finale preposto.

Parole chiave: Energia eolica, aerogeneratori, *Cp-Lambda*, *FAST*, sistema di controllo, accoppiamento codici, *onshore*, *offshore*.

Abstract

The aim of the work presented in this report is to carry out an analysis of an *offshore* wind turbine. To accomplish this goal a tool that can be used for modeling *offshore* wind turbines and predict their dynamic response needs to be developed.

The first part of the thesis regards the description of *Cp-Lambda* and *FAST* simulation codes along with the description of the *PoliWindController* control code. It is explained how these codes will be employed to build a single code with the characteristics of the two programs.

The second part describes the model of a 5 MW wind turbine used throughout this work. This model is developed by the *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) and it is used in their studies for both *onshore* and *offshore* applications. Afterwards the setup of the control system will be presented. Then the validation of the control system is carried out through different simulations performed with both the simulation codes.

In the last part, the study of the coupling between *Cp-Lambda* and *FAST* is reported. All the changes needed by the codes to perform co-simulations will be presented together with some tests to verify their validity.

At the end of the report the achieved results are discussed. Furthermore, future developments will be proposed to ensure that the tool that has been studied could accomplish its purpose.

Keywords: Wind energy, wind turbines, *Cp-Lambda*, *FAST*, control system, code coupling, *onshore*, *offshore*.

CAPITOLO 1

INTRODUZIONE

Nel periodo storico attuale si sta prestando sempre maggiore attenzione all’impatto ambientale di qualsivoglia tecnologia esistente. Da diversi anni a questa parte si è alla ricerca di fonti energetiche rinnovabili che possano dare un contributo significativo nel soddisfare il fabbisogno di energia richiesto. Sotto questo aspetto sono indicativi i dati forniti dalla *WindEurope*¹: nel 2016 in Europa oltre l’85% delle nuove installazioni sono di impianti di produzione di energia cosiddetta “pulita”. Tra queste l’energia eolica sta vedendo un notevole sviluppo. Si pensi che il 51% delle installazioni effettuate nell’ultimo anno sono di questo tipo.

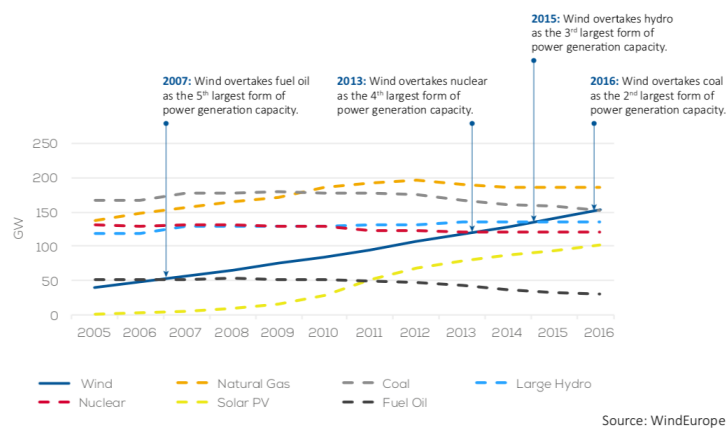


Figura 1 - Produttività energetica cumulativa delle diverse fonti nel corso dell’ultimo decennio

¹ *WindEurope* (ex EWEA) è l’associazione Europea per l’energia eolica. I dati riportati in questo capitolo sono tratti da [9].

Le installazioni sempre crescenti di anno in anno in Europa hanno portato l'eolico a scalare posizioni tra le diverse fonti energetiche rispetto alla produttività attestandosi recentemente al secondo posto. Attualmente all'incirca il 20% degli impianti di produzione di energia sfrutta la forza del vento. La quasi totalità dei 150 GW di energia prodotta annualmente grazie a questa fonte deriva da *onshore wind farm*. Le tecnologie ormai consolidate e la necessità trovare siti alternativi alla terraferma per le installazioni stanno portando l'attenzione verso l'ambiente *offshore*, come testimoniano gli investimenti sempre crescenti stanziati per lo sviluppo in questa direzione.

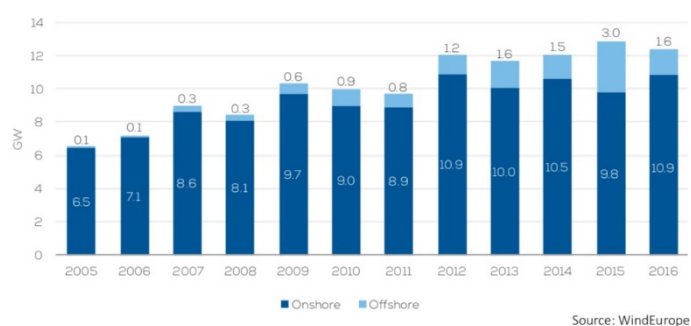


Figura 2 - Installazioni annuali di impianti di produzione di energia eolica nell'ultimo decennio

I vantaggi di sistemi di questo tipo sono infatti multipli. Innanzitutto essi sono caratterizzati da un ridotto impatto ambientale: i problemi di inquinamento visivo ma soprattutto acustico tipici delle installazioni *onshore* vengono accantonati. I siti in mare aperto permettono installazioni di macchine di dimensioni decisamente superiori rispetto a quanto sia possibile per i siti *onshore*. Se infatti turbine sulla terraferma hanno mediamente ratei non superiori ai 3 MW, l'obiettivo del prossimo decennio è di installare aerogeneratori da oltre i 10 MW. Come secondo aspetto, campi eolici progettati lontani dalle coste non risentono dell'orografia del territorio: le caratteristiche di ventosità di questi siti sono decisamente più favorevoli. Di contro sono i costi di installazione e manutenzione più elevati rispetto agli aerogeneratori *onshore*. La causa di ciò è da attribuirsi sia alle difficoltà costruttive e di trasporto delle enormi componenti della turbina che all'ambiente impervio in cui esse operano.

La progettazione di un impianto per la produzione di energia eolica in campo *offshore* necessita di una analisi molto approfondita. Infatti uno degli aspetti cruciali di questo tipo di installazioni è certamente la scelta della struttura di supporto. Questa scelta è fortemente influenzata dalle caratteristiche del sito, quali ad esempio la profondità delle acque, la regolarità del fondale e l'intensità di onde e maree. In base alle diverse proprietà che lo contraddistinguono si possono trovare strutture di supporto *fixed-bottom* come semplice pilone, tripodi, o strutture reticolari (*jackets*), oppure *floating*, ovvero caratterizzate da piattaforme galleggianti ancorate al fondale.

Quanto appena descritto ha portato allo sviluppo dei codici già esistenti per lo studio e la progettazione di turbine eoliche implementando modelli capaci di predire la risposta di sistemi complessi sotto l'azione di carichi di diversa natura, come i carichi aerodinamici e i carichi idrodinamici.

1.1. Il progetto "OC3"

L'*Offshore Code Comparison Collaborations* (OC3) è un progetto istituito sotto la supervisione della IEA² al quale partecipano diversi istituti di ricerca³. Gli obiettivi di OC3 prevedono lo sviluppo di una serie di modelli di riferimento e nuove strategie di modellazione, l'elaborazione e il confronto dei risultati per quanto riguarda lo studio di aerogeneratori in campo *offshore*. Tale lavoro di verifica ha portato a notevoli miglioramenti nella precisione di modelli e codici di simulazione ed ha aiutato ad identificare le carenze ed a migliorarne le prestazioni.

Il progetto OC3 utilizza il modello di aerogeneratore *NREL 5MW* di pubblico dominio. Il modello oggetto di studio rappresenta una turbina eolica ad asse orizzontale a tre pale sviluppato dalla *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). A questo aerogeneratore sono state accoppiate diverse strutture di supporto e simulate differenti

² *International Energy Agency*

³ Il progetto OC3 è ampiamente descritto nel testo di riferimento [3].
La descrizione del progetto prende spunto da [23].

storie di vento e onde, deterministiche e stocastiche. Il progetto si compone di diverse fasi, nelle quali la macchina è provata in varie configurazioni:

Fase I - *NREL 5MW* installata su un pilone con fondazioni rigide in acque profonde 20 metri;

Fase II - La fondazione del pilone della Fase I è stata resa flessibile applicando differenti modelli rappresentativi dell'interazione suolo-palo;

Fase III - *NREL 5MW* installata su una struttura tripode in acque profonde 45 metri;

Fase IV - *NREL 5MW* installata su strutture galleggianti in acque profonde 320 metri.

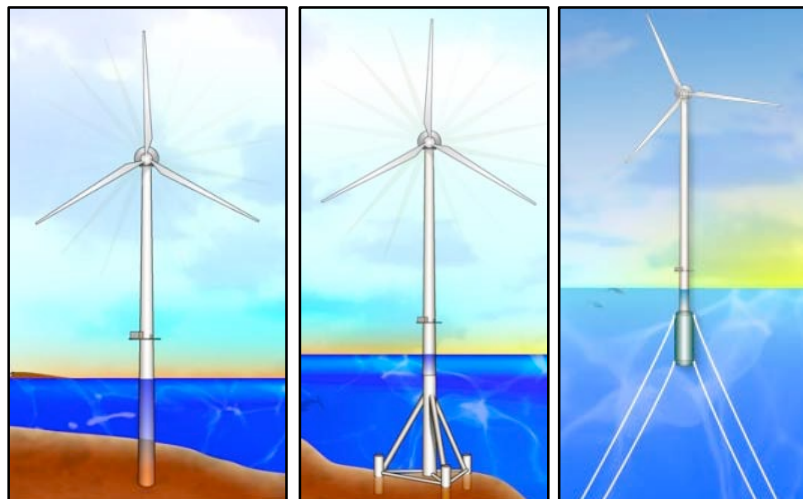


Figura 3 - Strutture di supporto utilizzate nelle diverse fasi del progetto OC3 [1]

L'esito delle prove effettuate con i vari codici nelle quattro fasi ha dato un riscontro positivo mostrando risultati in generale concordanti, anche se ancora affetti da diverse incertezze. I motivi di tali differenze risiedono principalmente nei differenti metodi di modellazione: per il calcolo strutturale ad esempio alcuni modelli sono a base modale, altri multi-corpo o basati su analisi FEM. Altre differenze riscontrate sono oltretutto riconducibili ai modelli aerodinamici e idrodinamici utilizzati dai vari codici.

1.2. Obiettivi della tesi

Il presente lavoro di tesi si pone come obiettivo l'analisi aero-servo-idro-elastica di un aerogeneratore multi-megawatt. Allo stesso modo in cui è stato sviluppato il progetto OC3, si utilizzeranno differenti codici aeroelastici per la modellazione e la comparazione della macchina oggetto di studio, *NREL 5MW*.

I codici di simulazione che verranno utilizzati sono *Cp-Lambda*, codice multi-corpo sviluppato dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali del Politecnico di Milano (DAER), e *FAST*, codice a base modale sviluppato dalla NREL. Insieme ai codici di simulazione si utilizzerà il codice di controllo *PoliWindController*, sviluppato dal DAER per interfacciarsi con *Cp-Lambda*, al quale sarà adibita la funzione di controllo della macchina durante la simulazione.

L'elaborato di tesi si compone nella maniera seguente:

Capitolo 2 - Definizione del problema: Vengono presentati i codici che verranno utilizzati nel corso della tesi delineando la strategia che si intende applicare per raggiungere l'obiettivo finale.

Capitolo 3 - Modellazione e controllo: Viene descritto il modello studio utilizzato nel progetto OC3, *NREL 5MW*, sul quale si basa il presente lavoro. Si mostra il confronto delle caratteristiche del modello e delle prestazioni a punto fisso valutate con i due codici. Infine, viene trattata l'impostazione del sistema di controllo *PoliWindController*.

Capitolo 4 - Validazione del sistema di controllo: Viene riportata la validazione del sistema di controllo implementato tramite simulazioni in ambiente *offshore* effettuate con entrambi i codici. Vengono previste differenti condizioni operative della macchina che hanno il compito di evidenziare il funzionamento dello schema di controllo scelto e al contempo le differenze tra i due modelli di calcolo.

Capitolo 5 - Studio dell'accoppiamento *Cp-Lambda* – *FAST*: Si applica la strategia tracciata in precedenza mostrando le modifiche da apportare ai due codici per permettere la co-simulazione. Lo strumento finale deve poter essere in grado di svolgere simulazioni nelle quali la dinamica dell'aerogeneratore viene modellata con *Cp-Lambda* tramite un calcolo aero-servo-elastico mentre la dinamica della struttura di supporto viene modellata con *FAST* tramite un calcolo idro-elastico. Il compito di coordinare la co-simulazione è affidato a *PoliWindController*, il quale deve provvedere alla corretta comunicazione tra i modelli aero-servo-elastico e idro-elastico oltre a svolgere la funzione di controllo della macchina.

Capitolo 6 - Conclusioni e sviluppi futuri: Vengono riproposti gli obiettivi raggiunti e proposti gli sviluppi futuri che il lavoro presentato può suggerire.

Appendice A: Viene riportata la modellazione della macchina *NREL 5MW* per il codice *Cp-Lambda*.

Appendice B: Viene approfondita la descrizione di come sono state effettuate le analisi per valutare caratteristiche globali e le prestazioni a punto fisso della macchina tramite i due codici.

Appendice C: Vengono riportate le tabelle che fanno riferimento a come è stato arricchito lo *swap array* con i valori della cinematica della piattaforma e dei carichi agenti su essa.

CAPITOLO 2

DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

In questo capitolo si presentano i due codici numerici, *Cp-Lambda* e *FAST*, che verranno utilizzati per le analisi insieme al sistema di controllo *PoliWindController*⁴. Viene delineato il modo in cui questi strumenti verranno utilizzati nel corso del lavoro.

2.1. Strumenti utilizzati

2.1.1. Cp-Lambda

Cp-Lambda (*Code for Performance, Loads, Aeroelasticity by Multi-Body Dynamic Analysis*) è un codice aero-servo-elastico basato su un approccio multi-corpo ad elementi finiti. Nasce per applicazioni elicotteristiche ed è stato successivamente ampliato implementando moduli necessari al calcolo di simulazioni dinamiche di turbine eoliche. Il codice è ampiamente validato con altri codici aeroelastici e con dati sperimentali ed è attualmente in uso nel settore industriale.

Tra i moduli presenti in *Cp-Lambda* figurano ad esempio quello atto all'implementazione del *Blade Element Momentum Theory* (BEMT), il modulo atto al calcolo del

⁴ Le informazioni descritte in questo capitolo sono reperibili in vasto dettaglio nei manuali e nella documentazione dei relativi codici. Per ulteriori dettagli si consultino i testi [4], [5] e [6]. Si ringrazia I. Quarta per la descrizione dei codici effettuata in [23] e da cui si è preso spunto.

wind shear e dell'influenza della torre sul vento che investe la macchina, e, inoltre, il modulo che permette il calcolo di carichi idrodinamici tramite la teoria di Morison.

Il codice non prevede alcuna ipotesi topologica di base. Al suo interno è presente una vasta libreria che comprende diverse tipologie di elementi che è possibile assemblare arbitrariamente: travi, corpi rigidi, molle lineari e angolari, giunti di diverso tipo, attuatori, sensori. Questo fa di Cp-Lambda un codice di assoluta flessibilità.

La modellazione aerodinamica e idrodinamica viene effettuata tramite *lifting lines*, o linee portanti, associabili alle travi. A ciascuna di esse corrisponde una serie di stazioni caratterizzate da coefficienti aerodinamici o idrodinamici a seconda del modello di calcolo scelto nella definizione della *lifting line*. Nel caso di modellazione aerodinamica, su ciascun nodo della *lifting line* i carichi sono valutati secondo il modello BEMT. Contrariamente, nel caso di modellazione idrodinamica la valutazione dei carichi avviene secondo il modello di Morison.

L'approccio FEM multi-body porta ad effettuare una modellazione distinta di ciascun elemento con il risultato di un sistema ad un numero elevato di gradi di libertà. In contrapposizione, il livello di accuratezza nella descrizione del modello può essere arbitrariamente tarato in modo da non eccedere nel tempo computazionale.

Lo schema topologico per la modellazione di una macchina HAWT (*Horizontal Axis Wind Turbine*) è mostrato in Figura 4.

Il modello è composto da diversi elementi:

- Travi: torre, pale, albero motore, ecc...
- Corpi rigidi: navicella, hub, ecc...
- Giunti: passo pala, yaw, eventuali fondazioni flessibili, ecc...
- Attuatori di posizione: passo pala e yaw
- Attuatori di forza: coppia al generatore

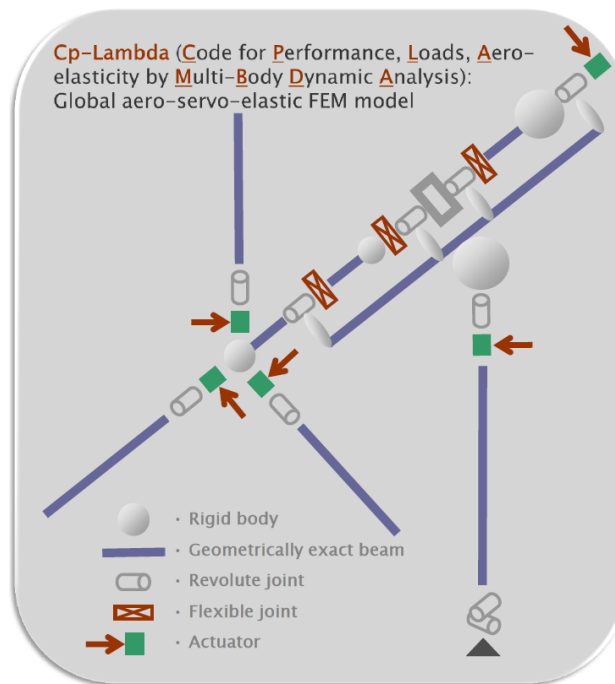


Figura 4 - Schema topologico HAWT in Cp-Lambda [2]

In questo schema non sono raffigurati i sensori. Questi elementi sono fondamentali per indagare il comportamento della macchina. Infatti i sensori sono necessari non solo *offline* per l'elaborazione dei risultati, ma anche *online* per permettere al sistema di controllo, che agisce tramite attuatori di posizione e di forza, di adattare la configurazione della macchina alle condizioni operative.

Il sistema di controllo corrisponde ad un codice sviluppato separatamente da Cp-Lambda. Il codice aeroelastico, come verrà successivamente spiegato in dettaglio, si interfaccia con qualsivoglia codice di controllo generato in stile *GH-Bladed*⁵.

Cp-Lambda non permette la modellazione del vento che impatta sul rotore. Per generare una storia di vento turbolento oppure modellare una raffica secondo norma-

⁵ *Bladed* è un pacchetto software integrato per l'analisi delle performance e il calcolo dei carichi di aerogeneratori, implementato da *Garrard Hassan & Partners Ltd* [7].

tive è necessario l'utilizzo di programma esterno. Il codice è scritto in modo da ricevere in ingresso le storie temporali di vento generate dal programma *TurbSim*⁶, codice distribuito dalla NREL.

2.1.2. FAST

FAST (*Fatigue, Aerodynamics, Structures, and Turbulence*) è un codice numerico atto alla simulazione dinamica di HAWT a due o tre pale distribuito dalla NREL che si avvale di una formulazione a base modale e multi-corpo combinate tra loro. Esso presenta modelli aerodinamici, idrodinamici, modelli dinamici di controllo e modelli strutturali necessari per descrivere un sistema aero-servo-idro-elastico e prevederne la risposta dinamica. Il codice si basa su modelli ingegneristici avanzati, derivati da leggi fondamentali ma con appropriate ipotesi e semplificazioni. Il codice è stato valutato da *Germanischer Lloyd Windenergie* e approvato per il calcolo, la progettazione e la certificazione di turbine eoliche *onshore*.

FAST permette di modellare diverse configurazioni di aerogeneratore, il che ne fa un programma versatile nell'ambito di simulazioni dinamiche di turbine eoliche. Tra le diverse possibilità si elencano HAWT a due o tre pale, hub fissi o teetering, rotori controvento o sottovento. A sua volta, anche la struttura di supporto può essere modellata in vario modo. Ad una configurazione *onshore* classica, si contrappongono diverse tipologie di struttura per applicazioni *offshore*: dalle *fixed-bottom* come semplice pilone, tripodi, o strutture reticolari (*jackets*) per installazioni in acque mediamente profonde, alle *floating* per installazioni in acque molto profonde caratterizzate da piattaforme galleggianti ancorate al fondale.

La Figura 5 mostra i gradi di libertà del modello FAST per aerogeneratori a due o tre pale.

⁶ *TurbSim* è un simulatore di vento turbolento che assume un processo stazionario sovrapponendo strutture coerenti turbolente alle storie temporali deterministiche che genera [8].

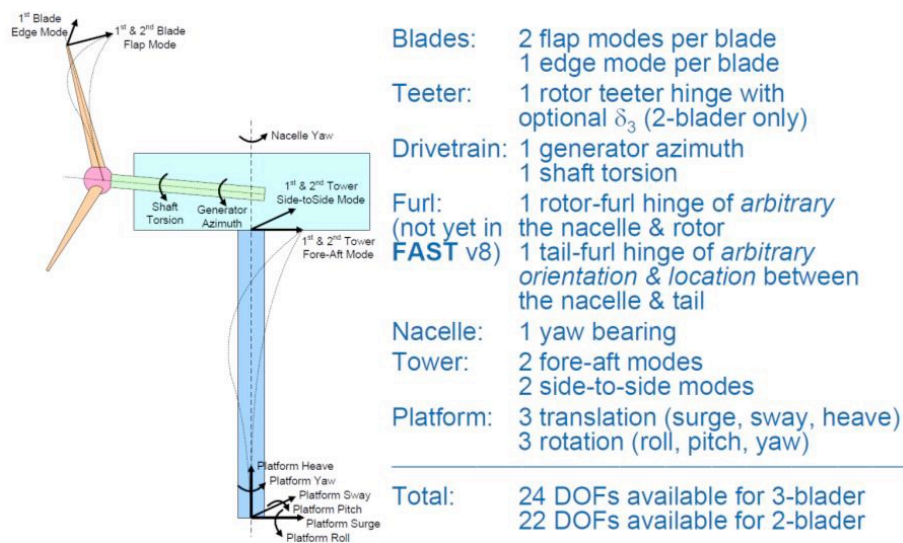


Figura 5 - GDL modello FAST [3]

Una turbina a tre pale viene modellata con nove corpi rigidi (piattaforma, hub, nacelle, ecc...) e cinque elementi flessibili (torre, tre pale, albero motore) per un totale di 24 gradi di libertà:

- Traslazione e rotazione piattaforma: 6 GDL (Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw);
- Flessibilità torre: 4 GDL (Torre ridotta ai soli primi due modi flessionali; ciascuno dei due modi vede un GDL longitudinale e un GDL trasversale);
- Nacelle yaw: 1 GDL;
- Generatore: 1 GDL;
- Flessibilità albero: 1 GDL;
- Flessibilità pala: 3 GDL per pala (Pala ridotta ai soli primi due modi flessionali out-of-plane e al solo primo modo flessionale in-plane; ciascuno dei modi vede un GDL);
- Rotor-Furl e Tail-Furl: 2 GDL.

Una turbina a due pale presenta invece 22 GDL. Ai 3 GDL di pala che si sottraggono rispetto alla configurazione a tre pale si aggiunge il GDL relativo al rotor teetering, disponibile solo per configurazione bipala.

FAST v8.x presenta una architettura modulare. In Figura 6 viene rappresentato come questa architettura differisca dalle precedenti versioni di FAST, evidenziando inoltre tutti i moduli disponibili all'interno del programma. Ciascun modulo si occupa di modellare una parte specifica dell'aerogeneratore e può essere disabilitato semplificando il modello in esame. Durante la simulazione essi vengono chiamati da un *driver*, ovvero quella parte di programma che ha il compito di gestire la simulazione nel suo complesso passando i dati tra i vari moduli e richiamandone i solutori. La modalità di esecuzione appena descritta viene definita *glue-code*. Sia il *driver* che i moduli che compongono il programma necessitano di file di input specifici. Nel file di input del *driver* vengono definiti i parametri della simulazione e quali moduli verranno utilizzati definendo i relativi file di input. In questi ultimi viene descritta le parte di modello a loro adibita.

Tra i moduli disponibili si elencano i principali:

- ElastoDyn: modulo fondamentale, l'unico che non può mai essere disattivato. È il modulo destinato alla risoluzione della dinamica strutturale. Il modello è una combinazione di formulazione multi-corpo (piattaforma, nacelle, generatore, ecc...) e a base modale (pale e torre). Per la rappresentazione modale di pala e torre si ipotizza il modello di trave isotropa di Eulero-Bernoulli soggetta a pura flessione senza offset tra CG e EA. Queste due semplificazioni riducono la complessità del problema: vengono trascurati il problema torsionale e assiale e vengono tenuti disaccoppiati i modi *in-plane* e *out-of-plane*;

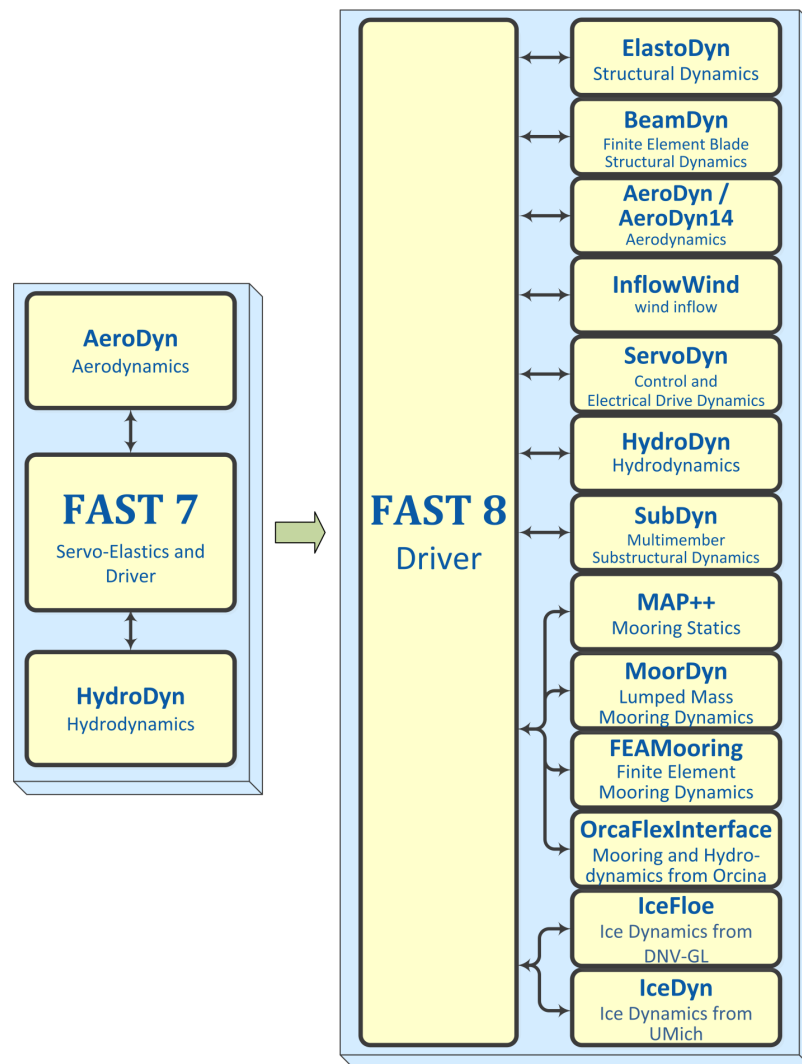


Figura 6 - Architettura di FAST [4]

- AeroDyn: è il modulo aerodinamico che accoppiato a FAST è in grado di simulare il comportamento aeroelastico della turbina eolica. Il modello si basa sulla teoria quasi-stazionaria BEM (*Blade Element Momentum Theory*). Include anche la possibilità di valutare l'influenza della torre sul vento locale sui nodi della pala e la resistenza aerodinamica della torre;
- ServoDyn: è il modulo preposto al controllo della macchina. Include modelli di controllo del passo pala, della coppia del generatore, dell'imbardata della navicella e frenate di emergenza. È possibile inoltre interfacciare il codice con un

-
- controller esterno compilato come una libreria dinamica (DLL) e progettato in stile *GH-Bladed*;
- HydroDyn: è il modulo che si occupa della generazione del moto ondoso e del calcolo dei carichi idrodinamici. È possibile generare differenti storie di onde regolari o stocastiche includendo anche effetti del secondo ordine sulla cinematica delle onde. Nella sua implementazione sono previsti differenti approcci per il calcolo dei carichi: soluzione della teoria delle strisce (o equazione di Morison), o della teoria potenziale dei flussi, o una combinazione delle due. Le diverse formulazioni sono necessarie per effettuare il calcolo di carichi idrodinamici sia per quanto riguarda strutture *fixed-bottom*, per i quali verrà sfruttata la teoria delle strisce, che per quanto riguarda sistemi flottanti, per i quali si utilizzerà la teoria potenziale dei flussi. È inoltre possibile simulare l'effetto di zavorre o inondazioni di parti della struttura nonché l'effetto della crescita marina sul calcolo dei coefficienti idrodinamici;
 - SubDyn: è il modulo che si occupa del calcolo della dinamica strutturale della tipologia di supporto *fixed-bottom*. Il solutore fa riferimento a due principali schematizzazioni ingegneristiche: (1) modello *linear frame finite-element beam* (LFEB), e (2) riduzione della dinamica del sistema attraverso il metodo Craig-Bampton. Quest'ultimo è coadiuvato da un *static-improvement method* (SIM) per ottenere una accuratezza migliore sul calcolo con la riduzione modale;
 - MAP++ / MoorDyn / FEAMooring: sono i moduli atti alla modellazione di sistemi flottanti.

Figura 7 e Figura 8 mostrano il principio di funzionamento *glue-code* del programma per applicazioni *offshore*, nei casi *fixed-bottom* e flottante.

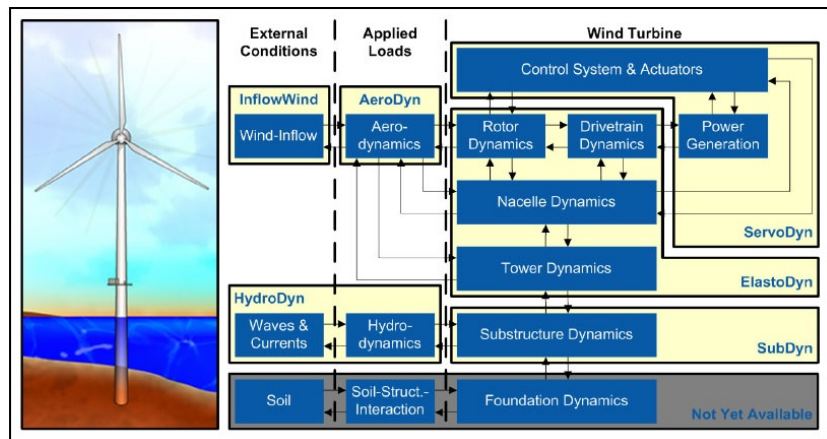


Figura 7 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom [4]

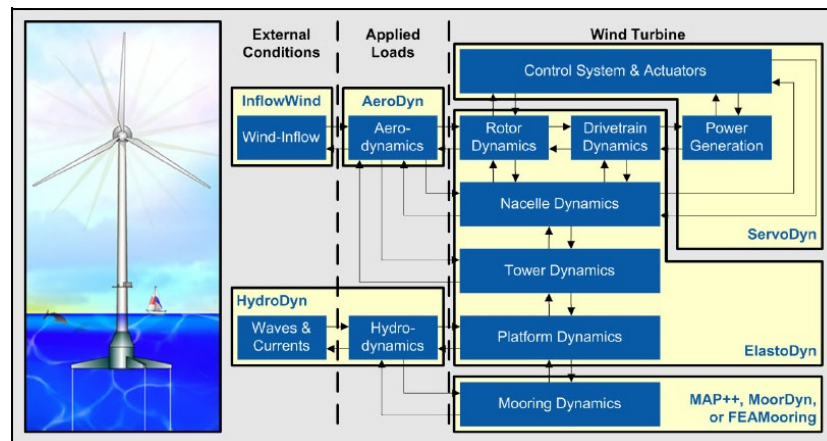


Figura 8 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore floating [4]

Alcuni dei moduli presenti in FAST hanno la possibilità di essere utilizzati singolarmente. NREL infatti distribuisce separatamente da FAST delle versioni *stand-alone* di HydroDyn e SubDyn. Questi due moduli in versione *stand-alone* permettono ad esempio di controllare a priori rispettivamente la storia di onde che verrà generata durante la simulazione o le proprietà strutturali della parte modellata con SubDyn. Poiché nella modalità *glue-code* di FAST i moduli sono gestiti dal *driver*, per far sì che essi possano essere utilizzati singolarmente anche la relativa versione *stand-alone* è provvista di un *driver* a cui è adibita la funzione di gestire l'esecuzione del singolo modulo.

2.1.3. PoliWindController

PoliWindController è il sistema di controllo progettato dal Dipartimento di Scienze e Tecnologie Aerospaziali (DAER) del Politecnico di Milano. Scritto in linguaggio C++, esso è compilato come libreria dinamica (DLL). Questo sistema di controllo è stato sviluppato in modo tale da essere compatibile con diversi codici di simulazione, utilizzando quindi l'interfaccia definita dal codice commerciale *GH-Bladed*. Questa caratteristica verrà sfruttata per utilizzare questo sistema di controllo, oltre che con Cp-Lambda, anche nelle simulazioni effettuate con FAST.

Lo scambio di informazioni tra codice di simulazione e controllore avviene attraverso un vettore di informazioni, lo *swap array*. Questo vettore viene allocato in memoria all'inizio della simulazione e viene aggiornato in tutta la sua durata. La scrittura dei dati all'interno dello *swap array* è compito sia del codice di simulazione che del Controller, i quali scrivono i loro *output* in determinate posizioni: il codice di simulazione fornisce le misure dei sensori necessarie al controllore nelle posizioni elencate in Tabella 1; il controllore fornisce i comandi, descritti in Tabella 2, calcolati dagli algoritmi di controllo sulla base misure lette dallo *swap array*. I comandi verranno utilizzati dal codice aeroelastico al passo di integrazione successivo per modificare la configurazione dell'aerogeneratore. Oltre a misure e comandi, lo *swap array* contiene anche parametri e informazioni necessari ad entrambi, con riferimento a Tabella 3.

Alla prima interrogazione, il controllore legge una serie di parametri di inizializzazione contenuti nel relativo file di input e definisce le sue variabili interne. Successivamente esso viene richiamato ogniqualvolta il tempo trascorso dall'ultima chiamata effettuata è superiore al *communication interval*, ovvero quel parametro definito dall'utente che definisce lo step temporale tra una chiamata del controllore e la successiva.

Tabella 1 - Misure scritte dal codice aeroelastico nello swap array e relative posizioni

Number	Variable Name	Description
4 – 33 – 34	Pitch	Measured Blade 1/2/3 Pitch
12 – 100 – 101	PitchRate	Measured Blade 1/2/3 Pitch Rate
14	ShaftPower	Electrical Shaft Power
15	ElecPower	Electrical Power (including Power Loss)
20	GenSpeed	Generator Speed
21	RotorSpeed	Rotor Speed
23	GenTq	Generator Torque
24	YawErr	Yaw Error
27	WindSpeed	Wind Speed at Hub Height
37	NacPos	Angle From North
53 – 54	AccFA / AccSS	Tower Tip F-A / S-S Acceleration
60	Azimuth	Blade 1 Azimuth

Tabella 2 - Comandi scritti dal Controller nello swap array e relative posizioni

Number	Variable Name	Description
35	Contactora	Generator Flag (1 = connected)
36	Brake	Brake Flag (1 = connected)
40 – 41 – 46	rPitchRateDemand	Demanded Blade 2/3/1 Pitch Rate
42 – 43 – 44	rPitchDemand	Demanded Blade 1/2/3 Pitch Angle
45	rPitchDemandColl	Collective Demanded Pitch Angle
47	TorqueDemand	Demanded Electrical Torque
48	YawRateDemand	Demanded Yaw Rate

Tabella 3 - Alcuni dei parametri generali e relativa posizione nello swap array

Number	Variable Name	Description
1	iStatus	Status Flag (0 = FirstCall)
2	Data.Time	Step Initial Time
3	Data.TimeStep	Delta Time Step
61	NumBlades	Number of Blades
91	Data.iState	Operational State
106	MinPitch	Minimum Pitch Angle

PoliWindController svolge anche la funzione di *Supervisione*. In qualità di supervisore è in grado di far simulare alla macchina diversi stati operativi, ciascuno identificato dalla flag *iState*, riportati in Tabella 4. La Figura 9 riporta la logica con cui il supervisore gestisce gli stati operativi della macchina.

Tabella 4 - Stati operativi dettati dal Supervisor

<i>iState</i>	Procedure
0	Idling
1	Power Production
2	Normal Shut Down
3	Emergency Shut Down with generator disconnected
4	Emergency Shut Down with generator connected
10	Start-Up

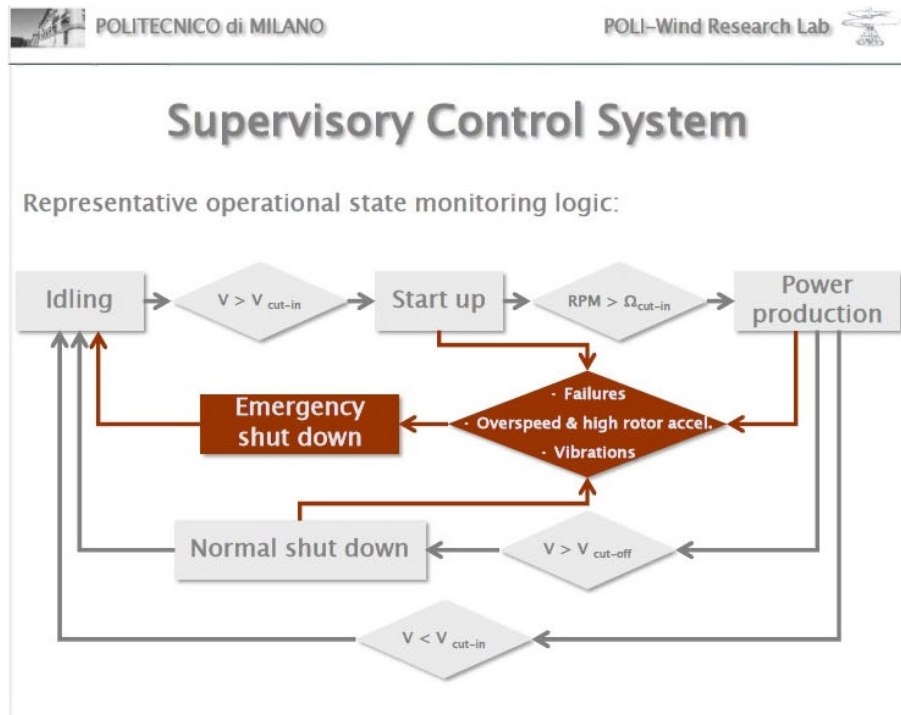


Figura 9 - Logica di controllo dello stato operativo del Supervisor

L'utente definisce lo stato operativo nel quale la macchina si troverà all'inizio della simulazione. Successivamente, ad ogni chiamata del controllore, la funzione di *Supervisione* esamina le condizioni in cui l'aerogeneratore sta operando per cambiare eventualmente lo stato operativo. Inoltre, il codice dà la possibilità di cambiare forzatamente l'*iState* ad un istante definito dall'utente. Come ulteriore funzione, è possibile simulare in determinati istanti, anch'essi definiti dall'utente, diverse tipologie di guasto quali la perdita improvvisa del controllo oppure un corto circuito.

Di seguito si riporta una breve descrizione degli stati operativi che prevede il supervisore:

-
- Idling ($iState = 0$): la macchina viene portata in condizione di “parcheggio”: il generatore è disabilitato e le pale vengono ruotate al massimo angolo di pitch ad un pitch rate pari a quello massimo impostato;
 - Power Production ($iState = 1$): è lo stato operativo durante il quale c'è effettiva produzione di energia. La procedura di controllo del passo pala e della coppia elettrica è applicata in accordo con lo schema di controllo scelto (PID, LQR MIMO, ecc.);
 - Normal Shut Down ($iState = 2$): la macchina entra in questo stato operativo quando il vento diventa troppo basso. Il generatore viene tenuto connesso (ovvero la macchina continua a produrre energia) fintanto che la velocità del rotore non scende sotto ad una certa soglia mentre le pale vengono ruotate al massimo angolo di pitch ad un pitch rate pari a quello massimo impostato. La coppia elettrica viene controllata come per $iState = 1$. Per valori di velocità del rotore al di sotto di una determinata soglia il rotore viene frenato attraverso l'applicazione di una coppia torcente. La macchina rimane in questo stato fino a quando non viene rilevato un vento superiore alla soglia di avvio, condizione che porta il *Supervisor* a riavviare la macchina impostando l'*operational state* di Start Up ($iState = 10$);
 - Emergency Shut Down with generator disconnected ($iState = 3$): è la situazione di spegnimento d'emergenza della macchina con generatore disconnesso che avviene quando viene riscontrato un qualsiasi tipo di guasto. Le pale vengono ruotate al massimo angolo di pitch ad un pitch rate proprio di questo stato operativo. All'occorrenza si applica una frenatura meccanica come nel caso di Normal Shut Down ($iState = 2$);
 - Emergency Shut Down with generator connected ($iState = 4$): coincide con lo stato operativo $iState = 3$ con la sola differenza che il generatore viene mantenuto connesso fintanto che la velocità del rotore non scende sotto ad una certa soglia, come in $iState = 2$;

-
- Start Up ($iState = 10$): consiste nella procedura di avviamento della macchina. Quando la velocità del rotore supera una certa soglia lo stato viene cambiato in Power Production ($iState = 1$) e la macchina è successivamente controllata in produzione di energia secondo lo schema di controllo scelto (PID, LQR MIMO, ecc.).

Oltre alle funzioni descritte, PoliWindController implementa degli osservatori che hanno il compito di ricostruire parte dello stato della macchina per controlli di tipo MIMO con retroazione sullo stato.

2.2. Strategia di utilizzo degli strumenti

L'analisi di un aerogeneratore per applicazioni *offshore* in Cp-Lambda è limitata solamente alla modellazione di una struttura di supporto composta da semplice pilone. Il presente lavoro pertanto si occupa di effettuare una analisi aero-servo-idro-elastica di un modello di aerogeneratore con struttura di supporto *fixed-bottom monopile* in modo da permettere un confronto diretto con il codice FAST. Successivamente, dato che il codice distribuito dalla NREL ha l'opportunità di effettuare la modellazione di differenti tipologie di strutture di supporto, sia *fixed-bottom* che *floating*, viene posto l'obiettivo di integrare Cp-Lambda con il solutore idro-elastico presente in FAST.

L'architettura modulare di FAST e la possibilità di utilizzare singolarmente alcuni dei suoi moduli, tra cui HydroDyn e SubDyn, mettono a disposizione dell'utente una vasta gamma di possibilità. Infatti grazie all'architettura modulare è possibile modificare facilmente le funzionalità dei singoli moduli per adattare alle proprie esigenze. Ad esempio è possibile rendere più complesso il sistema di controllo *built-in* modificando i file del codice sorgente relativi al modulo ServoDyn. Altrimenti, l'utilizzo in versione *stand-alone* dei suoi moduli permette di sfruttare le loro funzionalità in un contesto separato dalla simulazione completa dell'aerogeneratore.

Le caratteristiche appena descritte possono essere sfruttate contemporaneamente: la semplicità con cui è strutturato abbinata alla possibilità di utilizzare singolarmente i moduli offre l'opportunità di isolare blocchi di programma, previo alcune considerazioni e modifiche al codice. Si ottiene dunque un *ibrido* tra la modalità *glue-code* e la modalità *stand-alone*: dalla modalità *glue-code* si importa la logica con la quale i moduli che compongono il blocco vengono chiamati e il modo in cui essi comunicano tra loro; dalla modalità *stand-alone* si apprende quali siano i dati che vengono passati ai singoli moduli attraverso il *driver*.

L'obiettivo dunque è isolare il blocco di FAST che si occupa della modellazione e del calcolo di diverse strutture di supporto per applicazione *offshore* da utilizzare nelle simulazioni effettuate con Cp-Lambda. A tale scopo è necessario includere i moduli HydroDyn, SubDyn e quelli atti alla modellazione di sistemi flottanti (MAP++, MoorDyn, FEAMooring). In questo modo si ottiene uno strumento in grado di risolvere ciò che in Cp-Lambda è solo parzialmente implementato.

Riuscire ad adoperare il blocco di FAST appena descritto in combinazione con Cp-Lambda permetterebbe di avere un codice aero-servo-idro-elastico basato su un approccio multi-corpo ad elementi finiti in grado di modellare strutture di supporto più generiche rispetto al semplice *monopile*.

CAPITOLO 3

MODELLAZIONE E

CONTROLLO

In questo capitolo si descrive il modello matematico di un aerogeneratore da 5 MW sviluppato dalla NREL^{7 8} e utilizzato come riferimento in diversi progetti. Vengono mostrate le caratteristiche globali e le prestazioni a punto fisso della macchina in oggetto. Infine, viene illustrata l'impostazione del sistema di controllo PoliWindController utilizzato per la regolazione dell'aerogeneratore.

3.1. Modello NREL 5MW

NREL ha voluto sviluppare un modello multi-megawatt che fosse rappresentativo delle più comuni installazioni *onshore* e *offshore*. A causa dei costi elevati dovuti all'eventuale installazione di strutture di supporto in acque molto profonde, è stato valutato che la macchina dovesse avere una potenza non inferiore a 5 MW. Per poter comunque garantire la flessibilità di utilizzo in ambito sia *onshore* che *offshore*, sono stati presi come riferimento macchine da 5 MW quali i prototipi *Multibrid M5000* e *REpower 5M*. Sebbene per entrambi esista una documentazione di pubblico dominio, non è possibile reperire informazioni dettagliate sul loro progetto. Per completare lo studio del modello da 5 MW, NREL si è servita del modello concettuale da 6 MW

⁷ Il testo di riferimento per la descrizione del modello *NREL 5MW* è [1]. Ulteriori testi utilizzati di cui si riportano i dati sono [2] e [3].

⁸ Per una descrizione accurata di come è stato importato il modello in Cp-Lambda si rimanda ad Appendice A.

utilizzato nel *DOWEC (Dutch Offshore Wind Energy Converter) project*. La scelta è ricaduta su questo modello poiché risulta avere proprietà del tutto comparabili a quelle del prototipo *REpower 5M*. Dunque, le specifiche del modello *DOWEC 6-MW* sono state adattate alla macchina *REpower 5M* per la creazione del modello studio, *NREL 5MW*.

3.1.1. Proprietà generali macchina

Le proprietà generali della macchina sono riassunte in Tabella 5 riportata in [5] e sono riprese esattamente dal prototipo *REpower 5M*.

Tabella 5 - Proprietà generali NREL 5MW Baseline Wind Turbine

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple-Stage Gearbox
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Effective Rotor Diameter (with Precone effect)	125.88 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110'000 kg
Nacelle Mass	240'000 kg
Tower Mass	347'460 kg
Coordinate Location of Overall CM	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

3.1.2. Pala

Le proprietà generali della pala sono riassunte in Tabella 6 riportata in [5].

Tabella 6 - Proprietà generali pala

Length (w.r.t. Root Along Preconed Axis)	61.5 m
Mass Scaling Factor	4.536%
Overall (Integrated) Mass	17'740 kg
Second Mass Moment of Inertia (w.r.t. Root)	11'776'047 kg•m ²
First Mass Moment of Inertia (w.r.t. Root)	363'231 kg•m
CM Location (w.r.t. Root along Preconed Axis)	20.475 m

Structural-Damping Ratio (All Modes)	0.477465%
--------------------------------------	-----------

Proprietà strutturali

Le proprietà strutturali di ciascuna delle tre pale da 61.5 metri che compongono il rotore del modello studio *NREL 5MW* sono basate sulle caratteristiche delle pale da 62.6 metri del modello *DOWEC 6-MW*, descritte in Appendix A di [6]. Essendo più lunghe rispetto a quelle installate sul prototipo *REpower 5M*, le pale da 62.6 metri vengono troncate a 61.5 metri trovando le proprietà in estremità tramite una interpolazione lineare dei dati delle stazioni a 61.2-m e 61.7-m.

Le proprietà strutturali distribuite lungo la lunghezza della pala sono descritte in Table 2-1 di [5], approfondita in Appendice A.

Si mostrano di seguito alcuni grafici con le principali proprietà strutturali.

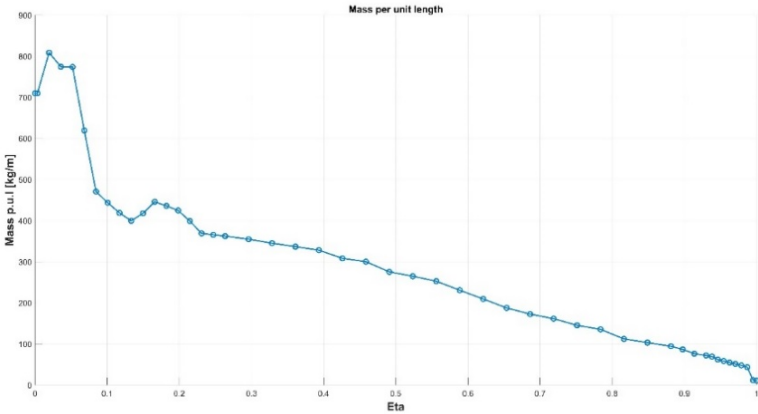


Figura 10 - Andamento della distribuzione di massa per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala.

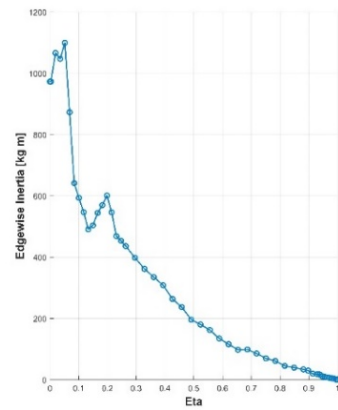
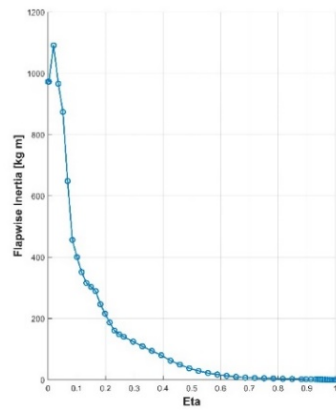


Figura 11(a,b) - Andamento della distribuzione delle inerzie a flappeggio(a) e ritardo(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala⁹

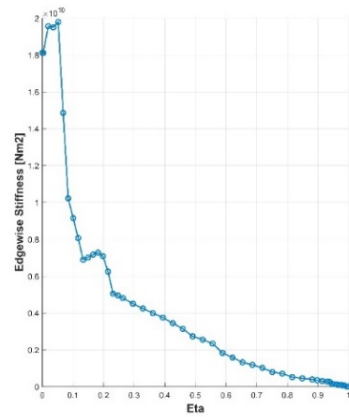
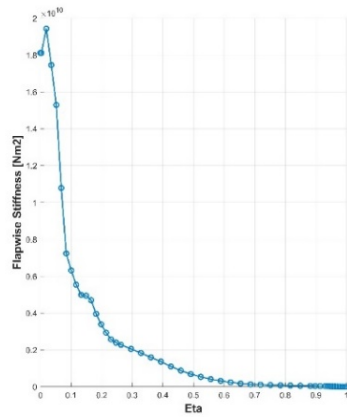


Figura 12(a,b) - Andamento della distribuzione delle rigidzze a flappeggio(a) e ritardo(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala

⁹ L'inerzia rispetto all'asse della pala si assume pari alla somma delle inerzie relative al flappeggio e al ritardo

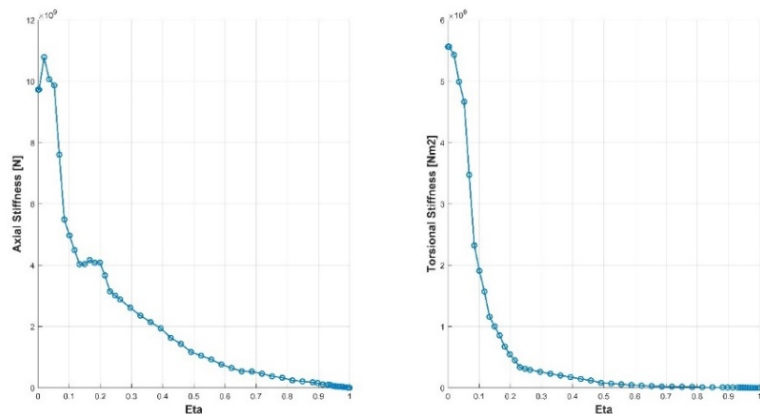


Figura 13(a,b) - Andamento della distribuzione delle rigidità assiale(a) e torsionale(b) per unità di lunghezza in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala¹⁰

Proprietà aerodinamiche

Le proprietà aerodinamiche vengono riprese dalle pale del modello *DOWEC 6-MW*.

La pala viene divisa in 17 elementi, o *pannelli*. Al centro di ciascun pannello vengono posti i nodi aerodinamici ai quali sono assegnati i valori di svergolamento aerodinamico e corda provenienti dai dati in Appendix A di [6]. La distribuzione di corda lungo l'apertura della pala è tale da ottenere una solidità di rotore del 5.16%.

Lungo l'apertura della pala sono identificati otto profili diversi, tutti documentati in Appendix B di [5]. A partire dalla radice si trovano come primo e secondo profilo due cilindri con coefficienti di resistenza rispettivamente pari a 0.5 e 0.35 (quest'ultimo è più propriamente un profilo di transizione tra il cilindro e un profilo aerodinamico). I restanti sono profili aerodinamici di spessori decrescenti le cui polari sono state create inserendo correzioni tridimensionali ai coefficienti utilizzati nel progetto *DOWEC*, anch'essi presenti in Appendix A di [6].

La descrizione aerodinamica della pala è esposta in Table 3-1 di [5] e viene approfondita in Appendice A.

¹⁰ Nonostante siano date in Table 2-1 di [1], il modello FAST non prende in considerazione il problema assiale e torsionale. Saranno pertanto usate solamente per il modello Cp-Lambda

Si mostrano di seguito i grafici della distribuzione di corda e lo svergolamento aerodinamico in apertura.

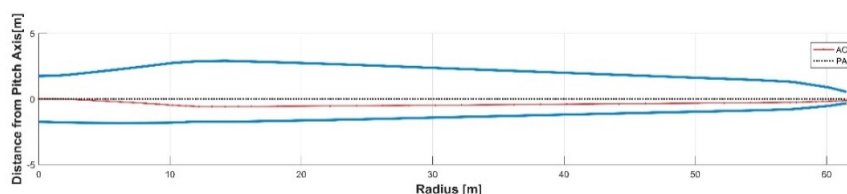


Figura 14 - Distribuzione di corda in funzione dell'apertura della pala con riferimento all'asse della pala e posizione del centro aerodinamico di ciascuna sezione

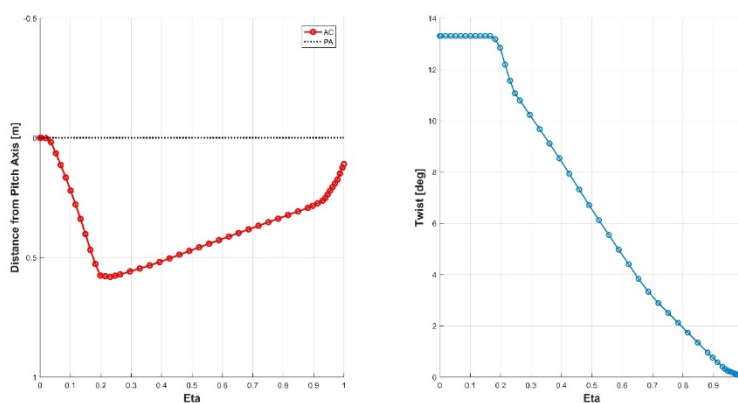


Figura 15(a,b) - (a) Posizione del centro aerodinamico di ciascuna sezione; (b) Distribuzione dello svergolamento in funzione dell'apertura (adimensionale) della pala

3.1.3. Hub e navicella

Come indicato in Tabella 5, l'hub è posizionato a 90 m dal suolo a sistema indeformato. La distanza verticale dall'estremità della torre alla posizione dell'hub è definita pari a 2.4m, distanza utilizzata nel modello *DOWEC 6-MW*. Di conseguenza, la posizione del cuscinetto d'imbardata (*Yaw Bearing* in Figura 16) della navicella è posizionato a 87.6m rispetto al suolo.

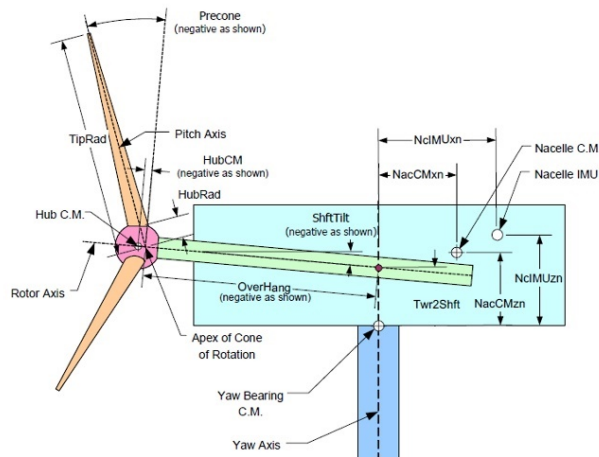


Figura 16 - Schematizzazione del gruppo rotore-navicella [3]

Viene definito un overhang¹¹ di 5m. Poiché l'albero (Shaft) è inclinato di 5° rispetto all'orizzontale, la distanza tra hub e asse torre valutata lungo l'asse dell'albero (*OverHang* in Figura 16) è pari a 5.0191m [$5/\cos(5^\circ) = 5.0191$] mentre la distanza tra cuscinetto di imbardata e albero lungo l'asse della torre (*Twr2Shft* in Figura 16) è pari a 1.96256m [$2.4 - 5 \cdot \cos(5^\circ) = 1.96256$].

Le proprietà dell'hub e della navicella sono riassunte nella Tabella 7 riportata in [5].

Tabella 7 - Proprietà hub e navicella

Elevation of Yaw Bearing above Ground	87.6 m
Vertical Distance along Yaw Axis from Yaw Bearing to Shaft	1.96256 m
Distance along Shaft from Hub Center to Yaw Axis	5.01910 m
Distance along Shaft from Hub Center to Main Bearing	1.912 m
Hub Mass	56'780 kg
Hub Inertia about Low-Speed Shaft	115'926 kg•m ²
Nacelle Mass ¹²	240'000 kg
Nacelle Inertia about Yaw Axis	2'607'890 kg•m ²
Nacelle CM Location Downwind of Yaw Axis	1.9 m
Nacelle CM Location above Yaw Bearing	1.75 m
Equivalent Nacelle-Yaw-Actuator Linear-Spring Constant	9'028'320'000 N•m/rad
Equivalent Nacelle-Yaw-Actuator Linear-Damping Constant	19'160'000 N•m/(rad/s)
Nominal Nacelle-Yaw Rate	0.3 ^º /s

¹¹ Per overhang si intende la distanza tra centro dell'hub e asse torre. In FAST [2] l'*OverHang* è definito come la distanza tra centro dell'hub e asse torre valutata lungo lo Shaft.

¹² La massa della navicella comprende anche la massa del generatore.

3.1.4. Generatore e albero motore

Le proprietà del generatore e dell'albero motore sono riassunte in Tabella 8 riportata in [5].

Tabella 8 - Proprietà generatore e albero motore

Rated Rotor Speed	12.1 rpm
Rated Generator Speed	1'173.7 rpm
Gearbox Ratio	97:1
Electrical Generator Efficiency	94.4%
Generator Inertia about High-Speed Shaft	534.116 kg•m ²
Equivalent Drive-Shaft Torsional-Spring Constant	867'637'000 N•m/rad
Equivalent Drive-Shaft Torsional-Damping Constant	6'215'000 N•m/(rad/s)
Fully-Deployed High-Speed Shaft Brake Torque	28'116.2 N•m
High-Speed Shaft Brake Time Constant	0.6 s

3.1.5. Struttura di supporto

Le proprietà della torre del modello *NREL 5MW* dipendono dal tipo di struttura di supporto scelto per sostenere tutta la parte di macchina appena descritta. Il tipo di struttura di supporto dipende a sua volta dal sito scelto per l'installazione dell'aerogeneratore. Difatti le tipologie di struttura per l'ambiente *offshore* possono essere molto diverse tra loro.

In questo paragrafo vengono prese in considerazione due tipi di struttura di supporto: torre per la versione *onshore*, documentata sempre in [5], e struttura di supporto per ambiente *offshore* in acque poco profonde, ovvero una struttura *fixed-bottom monopile*, documentata in [1].

Torre per applicazione *onshore*

Le proprietà della torre sono basate su quelle studiate dalla *DOWEC* e vengono riassunte in Tabella 9 riportata in [5].

Tabella 9 - Proprietà torre land-based

Height above Ground	87.6 m
Overall (Integrated) Mass	347'460 kg
CM Location (w.r.t. Ground along Tower Centerline)	38.234 m
Structural-Damping Ratio (All Modes)	1%

Il diametro e lo spessore sono assunti variare linearmente tra i valori alla base, 6 e 0.027 metri rispettivamente, e i valori all'altezza massima di 87.6 metri, 3.87 e 0.019 metri rispettivamente, come riportato in Table 9 di [6]. Nella medesima tabella si ritrovano anche il modulo di Young pari a 210 GPa, lo shear modulus pari a 80.8 GPa e l'effettiva densità del metallo pari a 8'500 kg/m³. Questo valore di densità aggiunge alla densità tipica del metallo, 7'850 kg/m³, la quota parte dovuta alla massa non strutturale (e.g., vernice, flange, bulloni etc.). Dato che per il prototipo *REpower 5M* ha una massa in testa torre maggiore rispetto a quella studiata dalla *DOWEC*, in [5] è fatto presente che gli spessori utilizzati sono stati aumentati del 30% rispetto a quelli della *DOWEC* in modo da rinforzare la torre.

Le proprietà distribuite della torre sono presentate in Table 6-1 di [5] e vengono approfondite in Appendice A.

Struttura di supporto per applicazione offshore:

Il modello per applicazione *offshore* utilizzato nella Fase I di OC3 è pensato per essere installato in acqua profonda 20 metri con fondazioni rigide.

Le proprietà della struttura di supporto sono riassunte in Tabella 10 riportata in [1].

Tabella 10 - Proprietà struttura di supporto per applicazione offshore

Tower-Top Height Above MSL	87.6 m
Tower-Base Height Above MSL	10 m
Water Depth (From MSL)	20 m
Overall (Integrated) Mass	522'617 kg
c.g. Location (w.r.t. Mudline Along Tower Centerline)	37.172 m
Structural-Damping Ratio (All Modes)	1%

Il diametro e lo spessore sono assunti variare linearmente tra i valori alla base, 6 e 0.027 metri rispettivamente, e i valori all'altezza massima di 87.6 metri, 3.87 e 0.019

metri rispettivamente, come riportato in Table 9 di [6]. La base della torre è posta ad una altezza di 10 metri sopra al *mean-sea level* (MSL) e ad essa è connesso un monopile di diametro e spessore costanti, rispettivamente di 6 e 0.060 metri. Nella medesima tabella si ritrovano anche il modulo di Young pari a 210 GPa, lo shear modulus pari a 80.8 GPa e l'effettiva densità del metallo pari a 8'500 kg/m³. Questo valore di densità aggiunge alla densità tipica del metallo, 7'850 kg/m³, la quota parte dovuta alla massa non strutturale (e.g., vernice, flange, bulloni etc.).

Le proprietà distribuite della torre sono presentate in Table 2 di [1] e vengono approfondite in Appendice A.

3.2. Validazione modello NREL 5MW

La descrizione di come sono state condotte le analisi per la validazione del modello è esposta approfonditamente in Appendice B. Si riportano di seguito i risultati significativi in termini di frequenze proprie, diagramma di Campbell e curve C_p - λ .

3.2.1. Frequenze proprie

Vengono riportate le tabelle con il confronto delle frequenze di pala e di torre per la versione *onshore* con massa in estremità. I risultati sono stati ottenuti attraverso il codice *BModes*, sviluppato dalla NREL ed utilizzato per valutare le deformate necessarie alla descrizione modale necessaria a FAST, e il codice *Cp-Lambda*, il quale invece permette direttamente il calcolo degli autovalori di parti singole della struttura.

Tabella 11 - Frequenze pala isolata [Hz]

MODO	FAST (<i>BModes</i>)	Cp-Lambda	Diff %
I Flap-Wise	0.6764	0.6732	0.474%
I Edge-Wise	1.0897	1.0847	0.464%
II Flap-Wise	1.9488	1.9557	-0.353%
II Edge-Wise	4.0431	4.0045	0.965%

Tabella 12 - Frequenze torre con tip mass [Hz]

MODO	FAST (BModes)	Cp-Lambda	Diff %
I Side-Side	0.31876	0.31353	1.669%
I Fore-Aft	0.32179	0.31652	1.665%
II Side-Side	1.47862	1.48052	-0.128%
II Fore-Aft	1.88104	1.89355	-0.660%
III Side-Side	2.24135	2.26567	-1.073%
III Fore-Aft	4.73431	4.73201	0.049%
I Torsional	5.19806	5.23718	-0.747%

La Tabella 11 e la Tabella 12 evidenziano differenze percentuali tra i modi di pala e torre inferiori al 2%, dimostrando come il modello implementato in Cp-Lambda sia coerente con il modello sviluppato dalla NREL.

3.2.2. Diagramma di Campbell

L'analisi delle frequenze del sistema accoppiato è descritta dal diagramma di Campbell. La Figura 17 raffigura il confronto tra i diagrammi di Campbell del modello *onshore* evidenziando un buon grado di comparazione tra i due modelli.

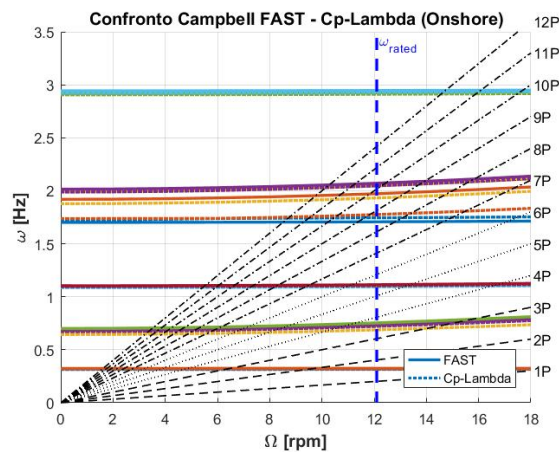


Figura 17 - Confronto diagramma di Campbell del modello onshore con forzanti

3.2.3. Curve $C_p-\lambda$

Le curve $C_p-\lambda$ sono indicative delle prestazioni a punto fisso. Le analisi sono state svolte in diverse casistiche utili a verificare oltre al funzionamento della macchina, anche i modelli aerodinamici e strutturali implementati nei due codici.

Vento assiale – 1 m/s

La Figura 18 mostra il confronto tra le curve $C_p-\lambda$ per il caso di vento assiale di 1 m/s.

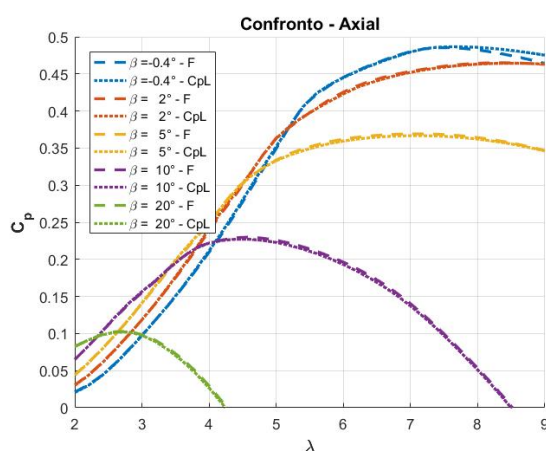


Figura 18 - Curve $C_p-\lambda$ con vento assiale

Tabella 13 - Confronto valori curve $C_p-\lambda$ – Caso vento assiale

	FAST	Cp-Lambda	Diff %
MaxCp	0.4854	0.4866	-0.24%
TSR @ MaxCp	7.593	7.60	-0.09%
Pitch @ MaxCp	-0.4°	-0.6°	-
MaxElTorque [kN]	3'901.80	3'901.41	0.01%
Vrated [m/s]	11.263	11.254	0.08%
Ω rated [RPM]	12.963	12.964	-0.01%

In seguito a questa analisi è possibile affermare che la modellazione aerodinamica dei due codici è congruente.

La Tabella 13 infatti mostra come i due punti di funzionamento ottimo nel diagramma C_p -TSR ottenuti con i due codici sono molto prossimi attestando all'1% la differenza tra i valori del C_p massimo e del TSR ottimo (C_p^* e λ^*).

Vento orizzontale – 11.4 m/s

Questa analisi descrive il reale funzionamento della macchina a punto fisso. In Figura 19 si mostra il confronto tra le curve ottenute nel caro di vento orizzontale con velocità pari a 11.4 m/s.

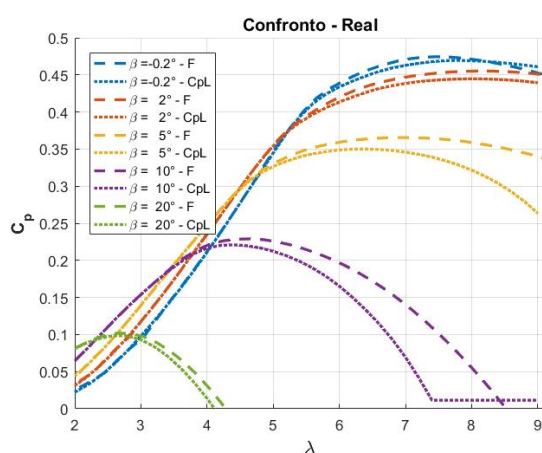


Figura 19 - Curve C_p - λ con vento orizzontale di 11.4 m/s

Questa casistica fa emergere le differenze nella modellazione strutturale implementata nei codici. Ad elevati valori di passo i C_p ottenuti mostrano discrepanze. La spiegazione risiede nel fatto che il calcolo a base modale di ElastoDyn in FAST porta a trascurare l'effetto della torsione della pala che invece è tenuto in conto da Cp-Lambda. Ciò viene dimostrato rieseguendo la medesima analisi in Cp-Lambda irrigidendo la pala a torsione, come mostrato in Figura 20.

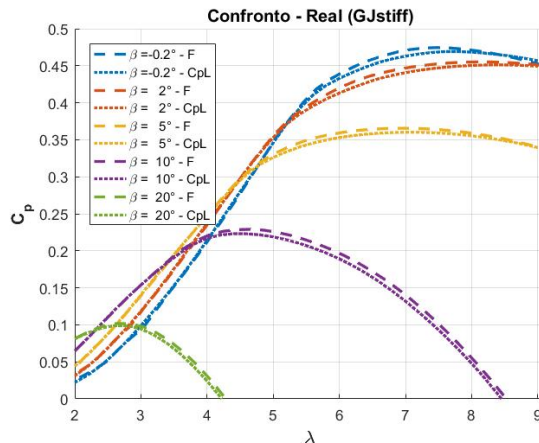


Figura 20 - Curve C_p - λ con vento orizzontale di 11.4 m/s (Pala irrigidita a torsione)

3.3. Controllo

3.3.1. Controllo di un aerogeneratore

Un corretto e preciso controllo della macchina è assolutamente determinante per garantire ottime prestazioni dell'aerogeneratore. La necessità di installare un sistema di controllo nasce dal fatto che la macchina lavora in condizioni ambientali mutevoli, e pertanto è opportuno che la sua configurazione si adatti ai diversi venti a cui è soggetta.

In fase di progettazione vengono definite le velocità di vento di *Cut-In* (V_{CI}) e di *Cut-Out* (V_{CO}) che ne definiscono il range operativo. In base alle caratteristiche di ventosità del sito si stabilisce la velocità di vento minima a partire dalla quale la macchina erogherà la potenza nominale, ovvero la velocità di vento *Rated* (V_R). Nel caso in esame, questi dati sono presenti in Tabella 5 e riportati di seguito:

Rating	5 MW
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s

La Figura 21 rappresenta le due regioni di controllo, regione II e regione III, che vengono individuate una volta definite le tre velocità di vento appena descritte.

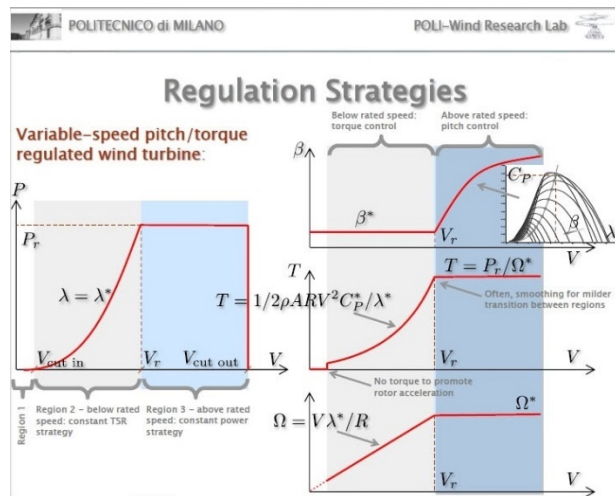


Figura 21 - Regione II e regione III

Per identificare la traiettoria di regolazione che definisce il comportamento della macchina nel suo range operativo occorre effettuare lo studio delle curve C_p - λ . Attraverso di esse è possibile stabilire:

- per la regione II i valori di ottimo (β^* e λ^*) e di coppia elettrica al variare del vento;
- per la regione III i valori di passo pala al variare del vento.

Nel caso sia presente il vincolo di tipo acustico, tipico delle installazioni *onshore*, la velocità di rotazione viene limitata ad un valore massimo. Per la macchina in esame viene imposto il vincolo di velocità massima in estremità pala di 80 m/s. Avendo il rotore un raggio di 63 metri, il vincolo sulla *tip speed* si traduce in una velocità di rotazione massima di 12.1 rpm. Se la velocità di rotazione nominale (Ω_R) calcolata tramite il λ^* risulta superiore al vincolo imposto, allora nasce una regione intermedia tra la regione II e la regione III, detta appunto regione II $\frac{1}{2}$ e raffigurata in Figura 22a.

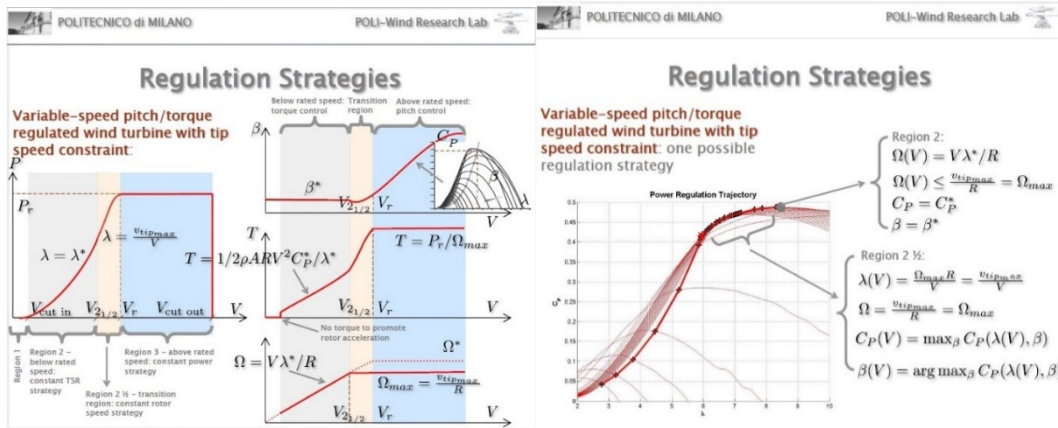


Figura 22(a,b) - (a) Regione II, regione II 1/2 e regione III; (b) Traiettorie di regolazione in caso di presenza del vincolo di tipo acustico

Come si nota in Figura 22b, la regione II 1/2 ha inizio ad una velocità di vento necessariamente inferiore a V_R . In questa regione la macchina non lavora più nelle condizioni di ottimo. La necessità di lavorare ad una velocità di rotazione inferiore impone l'erogazione di una coppia maggiore in regione III per far sì che la macchina produca i nominali 5 MW.

La Figura 23 riporta la traiettoria di regolazione per il modello *NREL 5MW* ricavata a partire dall'analisi delle curve C_p - λ precedentemente svolte evidenziando come essa si modifichi per la presenza del vincolo sulla *tip speed*.

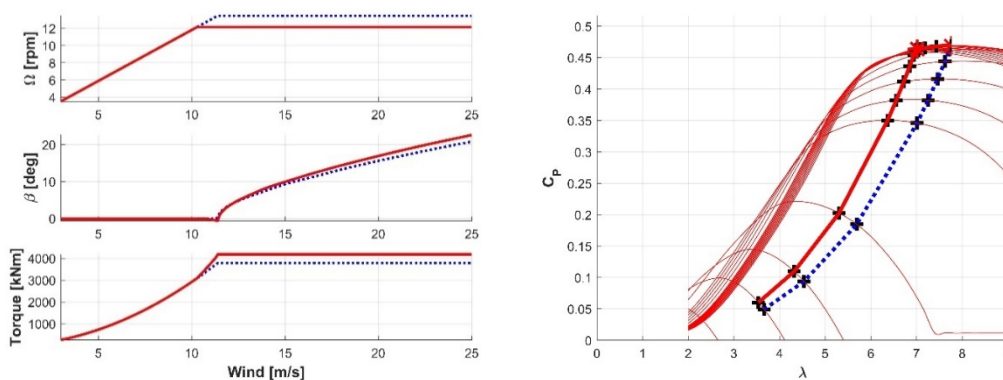


Figura 23(a,b) - Confronto tra il controllo effettuato in assenza (linea blu) e in presenza (linea rossa) del vincolo sulla tip speed: (a) Ω , β e coppia al variare della velocità del vento; (b) traiettoria di regolazione del passo pala nella curva C_p - λ

3.3.2. Impostazione del sistema di controllo

PoliWindController permette la scelta di diverse tipologie di controllo:

- PID sul passo, Look Up Table sulla coppia;
- LQR Output Feedback;
- LQR Full State Feedback;
- LQR Full State Feedback con Integral State.

La strategia utilizzata per il controllo della macchina in esame è LQR Full State Feedback con Integral State. Questa scelta è necessaria poiché la regione II $\frac{1}{2}$ è critica per un tipo di controllo PID sul passo e Look Up Table (LUT) sulla coppia, come evidenziato in Figura 24.

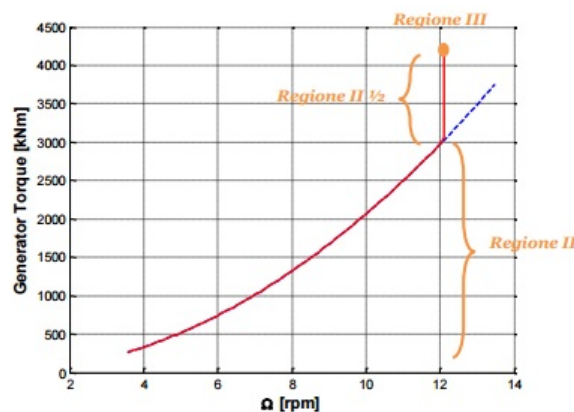


Figura 24 - Traiettoria di regolazione – Curva T_e - Ω [7]

In regione II $\frac{1}{2}$, all'aumentare della velocità di vento la velocità di rotazione deve essere mantenuta costante mentre la coppia deve aumentare fino ad un valore tale da produrre la potenza nominale della macchina. Per questo motivo si perde l'univocità nella LUT tra velocità di rotazione e coppia erogata. Il controllo di tipo LQR non ha problemi a gestire questa regione intermedia poiché è tarato sulla velocità del vento anziché sulla velocità di rotazione del rotore.

Il LQR (*Linear Quadratic Regulator*) è un sistema di controllo basato su un modello di macchina ridotto a sei stati e due input:

Tabella 14 - Stati LQR

Stati	
d	spostamento estremità torre
\dot{d}	velocità estremità torre
Ω	velocità di rotazione rotore
β_e	passo pala effettivo
$\dot{\beta}_e$	pitch rate effettivo
T_{el_e}	coppia elettrica effettiva

Tabella 15 - Input LQR

Input	
β_c	passo pala comandato
T_{el_c}	coppia elettrica comandata

Il sistema è non-lineare ed è descritto da quattro equazioni:

- Dinamica dell'albero;
- Movimento Fore-Aft dalle Torre;
- Dinamica dell'attuatore del passo pala (secondo ordine);
- Dinamica del generatore elettrico (prim'ordine).

Il sistema viene linearizzato in condizioni stazionarie per diversi valori della velocità del vento medio¹³ V_m^* all'interno del range operativo della macchina come mostrato in Figura 25b.

¹³ La turbolenza non viene presa in considerazione: $V_t = 0$

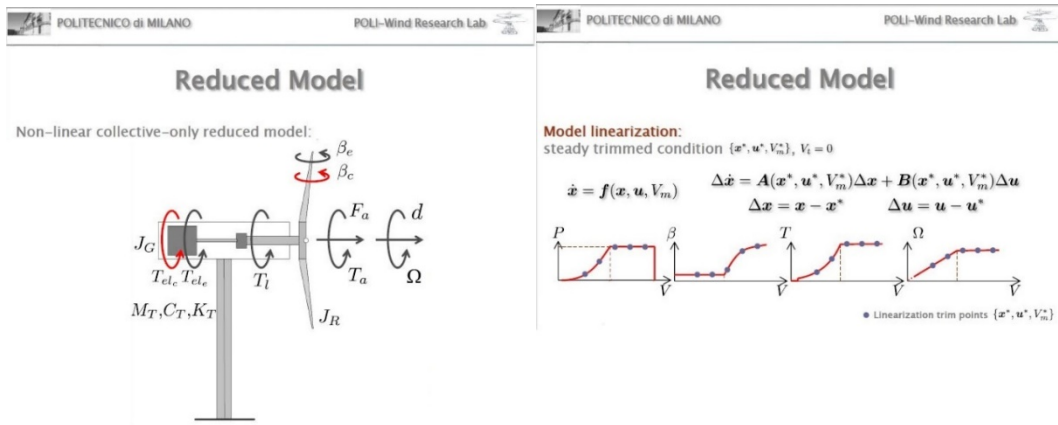


Figura 25(a,b) - (a) Modello ridotto; (b) Punti di trim sulla traiettoria di regolazione

Per ciascuno di questi punti, detti punti di *trim*, viene calcolata la matrice dei guadagni $K(V_m^*)$ attraverso un problema di ottimizzazione vincolato che porta alla risoluzione dell'equazione di Riccati.

Il vento e gli stati della macchina possono essere direttamente misurati oppure ricostruiti tramite osservatori. PoliWindController dispone anche della funzione di *wind* e *tower observer*, i quali non verranno utilizzati nel caso in esame.

Il tipo di controllo LQR è più complesso rispetto al controllo PID sul passo e LUT sulla coppia. Mentre con il PID sono da impostare solo tre guadagni (proporzionale K , integrativo I , derivativo D), con il controllo LQR si hanno ben due matrici, Q e R relative rispettivamente agli stati e agli input, di dimensioni corrispondentemente di 6×6 e 2×2 .

Nel caso del modello *NREL 5MW* i guadagni scelti sono i seguenti:

$$- Q = \text{diag}([1 \ 1 \ 10 \ 1 \ 1 \ 1]);$$

$$- R = \text{diag}([1 \ 1]).$$

Sebbene più sofisticato del controllo PID, il controllo LQR può nascondere comunque delle inaccurattezze dovute ad esempio ad imprecisioni del modello linearizzato o ad una cattiva una scelta dei pesi.

Per limitare questo tipo di inaccurately, un ulteriore affinamento del sistema di controllo LQR è l'utilizzo dell'Integral State sulla velocità di rotazione del rotore: $\int \Omega dt$. Questa nuova quantità viene inserita come settimo stato, costruendo dunque un nuovo vettore $\underline{x}_{augmented}$:

$$\underline{x}_{augmented} = \left(d, \dot{d}, \Omega, \beta_e, \dot{\beta}_e, T_{el_e}, \int \Omega dt \right)^T$$

Il vantaggio di questo tipo di controllo è che si ha una maggiore precisione nell'inseguimento della velocità di rotazione ottima per ciascuno dei punti di *trim*, con un conseguente miglioramento delle prestazioni in termini di potenza erogata.

CAPITOLO 4

VALIDAZIONE DEL SISTEMA DI CONTROLLO

In questo capitolo si effettua la validazione del sistema di controllo implementato tramite simulazioni dinamiche del modello *offshore*. Si presentano i risultati ottenuti con i due codici di simulazione per valutare l'interazione tra essi e PoliWindController.

4.1. Utilizzo di PoliWindController con FAST

Il controllo dell'aerogeneratore in FAST è affidato al modulo ServoDyn. Questo modulo include una serie di funzioni di base per il controllo dell'aerogeneratore, tra cui il controllo del passo pala, il controllo della coppia elettrica, il controllo in yaw, l'imposizione di frenate di emergenza, ecc. Ha inoltre la possibilità sia di implementare direttamente all'interno del codice le proprie architetture di controllo, che di interfacciarsi tramite la subroutine *Bladed Interface* con controller esterni compilati come librerie dinamiche e formulati in stile *GH-Bladed*. Analogamente al codice Cp-Lambda quindi, FAST offre la possibilità di interfacciarsi con un codice di controllo esterno attraverso lo *swap array*.

NREL distribuisce insieme al codice FAST una DLL per il controllo compilata, appunto, in stile *GH-Bladed* denominata *DISCON.dll*. Anch'essa come PoliWindController necessita di alcuni parametri quali il *communication interval*, il massimo passo pala, il massimo rate di cambio passo pala, le grandezze *Rated* per la regione III, la Look Up

Table ecc. Questi parametri devono essere inseriti dall'utente nel file di input di ServoDyn e vengono gestiti dalla *Bladed Interface*. Al primo step di integrazione l'interfaccia scrive i parametri direttamente nello *swap array*, senza che questi vengano più modificati o riscritti nel corso della simulazione. Quando *DISCON.dll* viene richiamata, essa legge dallo *swap array* oltre alle misure anche i parametri scritti all'inizio della simulazione.

Contrariamente, alla prima chiamata PoliWindController legge i parametri da un file testo esterno e li salva come parametri interni. Gli unici parametri che legge dallo *swap array* sono il tempo corrente della simulazione, il *communication interval* e il *DLL_InFile*, parametro che corrisponde alla stringa contenente il nome e il percorso dell'eventuale file di inizializzazione della DLL. Di conseguenza, i restanti parametri da inserire nel file input di ServoDyn che FAST gestisce tramite la *Bladed Interface* vengono ignorati.

Per utilizzare dunque PoliWindController con FAST è necessario solamente che il codice aeroelastico sia in grado di far leggere al controllore il suo file di impostazioni. Ciò è possibile poiché tra i parametri che il modulo ServoDyn passa alla DLL si trova il parametro *DLL_InFile*. Quest'ultimo, nonostante non venga utilizzato da *DISCON.dll*, è comunque presente all'interno del modulo ServoDyn per permettere a FAST di interfacciarsi con controller esterni più complessi, come PoliWindController.

4.2. Simulazioni NWP (*Normal Wind Profile*)

Le simulazioni NWP (*Normal Wind Profile*) prevedono un vento orizzontale non turbolento costante nel tempo con velocità nominale riferita all'altezza del centro dell'hub. Ad esso è applicato il *wind shear* verticale, ovvero un profilo di velocità variabile con l'altezza dal suolo, come mostrato in Figura 26.

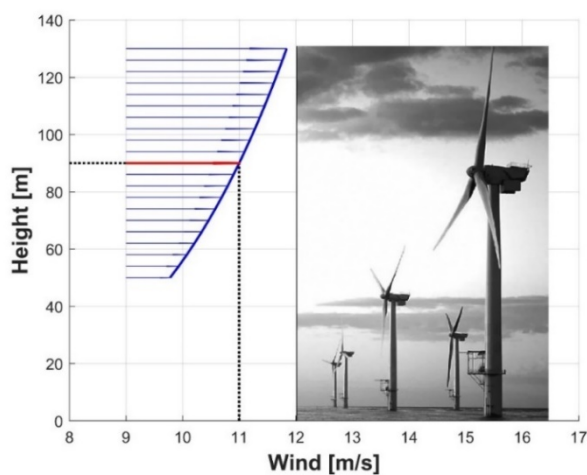


Figura 26 - Normal Wind Profile con vento di 11 m/s riferito all'altezza dell'hub di 90 metri

La generazione della storia di onde utilizzata da entrambi i codici è stata affidata al modulo HydroDyn, in modo tale da non avere alcuna discordanza tra le condizioni in cui opera la macchina.

Per assolvere alla funzione di solo generatore di onde, HydroDyn è stato utilizzato in versione *stand-alone*. Questa versione, distribuita sempre dalla NREL separatamente dal codice FAST, necessita di un file input aggiuntivo, *driver input file*, che permette al modulo di reperire le informazioni che gli verrebbero altrimenti fornite dal codice. Al contrario, quando il modulo è accoppiato FAST, ovvero in modalità *glue-code*, esso è preposto anche al calcolo dei carichi idrodinamici che agiscono sulla struttura. HydroDyn svolge questo compito utilizzando la teoria delle strisce (ovvero l'equazione di Morison), per il calcolo dei carichi su strutture fisse, o la teoria del flusso potenziale, per il calcolo dei carichi su strutture flottanti.

Nel caso in questione, la storia dinamica del moto ondoso viene modellata utilizzando la teoria lineare di Airy del prim'ordine che fornisce appunto una descrizione linearizzata della propagazione delle onde sulla superficie di un fluido omogeneo. I parametri necessari a questo tipo di modellazione sono il periodo e l'ampiezza massima dell'onda e sono stati impostati rispettivamente a 10 secondi e 6 metri.

Tramite un sprogramma in linguaggio Matlab è stato convertito il file *output* di Hydro-Dyn contenente le storie temporali di velocità e accelerazione delle particelle di fluido nei file input per Cp-Lambda. In Figura 27 sono riportate per diverse profondità le componenti di velocità delle particelle di fluido. Il sistema di riferimento utilizzato per le onde coincide con il sistema di riferimento inerziale di FAST:

- Asse x-wave (Surge): allineato con la direzione nominale del vento orizzontale;
- Asse z-wave (Heave): allineato con l'asse della torre;
- Asse y-wave (Sway): a formare una terna destrorsa.

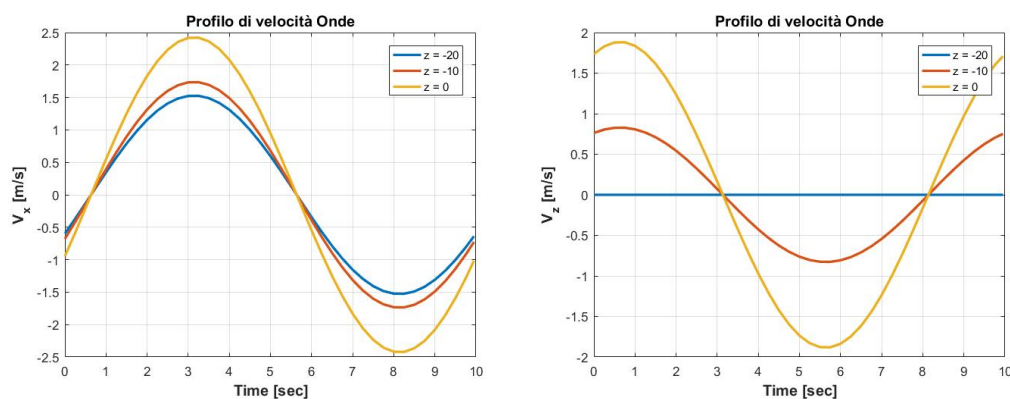


Figura 27(a,b) - Componenti $x(a)$ e $z(b)$ della velocità delle particelle di fluido a differenti profondità

La componente y della velocità e dell'accelerazione delle particelle di fluido sono nulle poiché si ipotizza una direzione delle onde allineata con la direzione del vento.

4.2.1. Valutazione dello schema di controllo

Storie temporali dei sensori relativi al controllo

Vengono riportate di seguito le storie temporali della velocità di rotazione del rotore, del passo pala e della potenza erogata per velocità di vento rappresentative dell'intero range operativo: 7 m/s, 11 m/s, 15 m/s, 23 m/s.

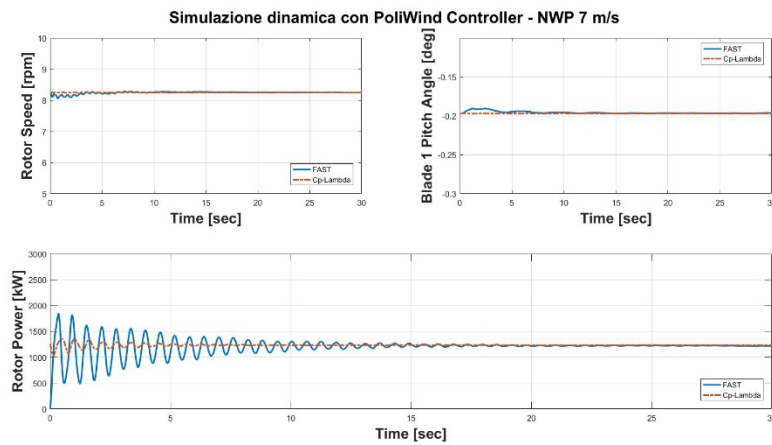


Figura 28 - NWP 7 m/s: regione II. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore

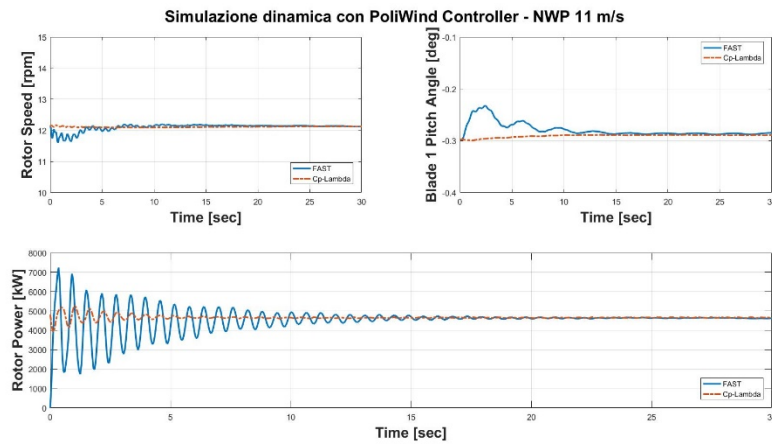


Figura 29 - NWP 11 m/s: regione II½. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore

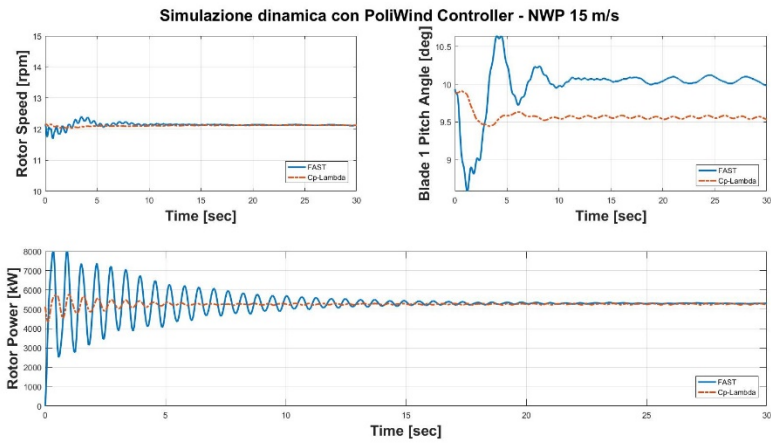


Figura 30 - NWP 15 m/s: regione III. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore

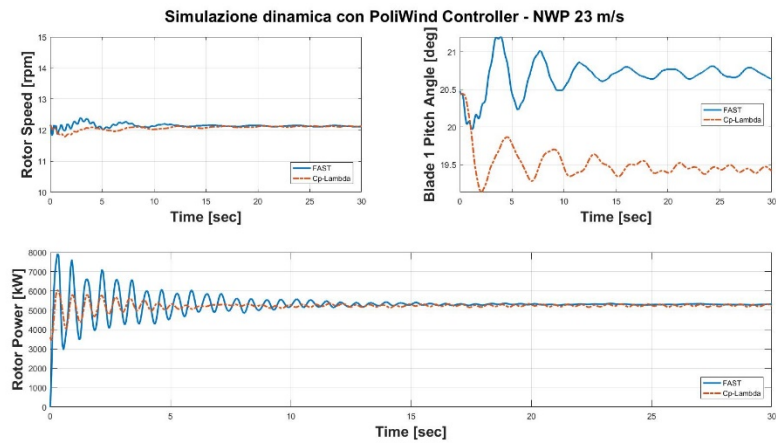


Figura 31 - NWP 23 m/s: regione III. Velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza del rotore

Si riportano le differenze percentuali delle velocità di rotazione del rotore e degli angoli di passo pala ottenute nei due codici nelle diverse simulazioni. I valori presi in considerazione sono i valori medi delle misure di ciascun sensore degli ultimi 50 dei 100 secondi di simulazione.

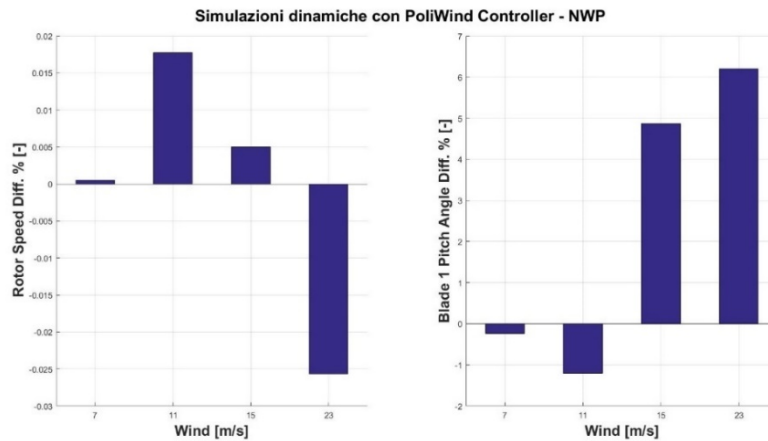


Figura 32(a,b) - Differenze percentuali di velocità di rotazione del rotore(a) e passo pala(b) tra FAST e Cp-Lambda

La differenza percentuale tra le velocità di rotazione del rotore (Figura 32a) si attesta al di sotto dello 0.03%, mostrando l'efficacia dello schema di controllo implementato. Il controllo LQR con Integral State infatti è stato utilizzato per inseguire al meglio la velocità del rotore.

Per quanto riguarda il passo pala invece si può notare in Figura 32b che più la velocità del vento è alta e più la differenza è consistente. Come evidenziato nell'analisi delle curve $C_p-\lambda$, questo è da imputarsi principalmente al fatto che FAST non modelli la torsione a differenza di Cp-Lambda. Infatti l'azione del vento porta la pala a torcersi diminuendo l'angolo di incidenza in modo tale da scaricarsi. Dato che in FAST questo effetto non viene preso in considerazione, il controllore necessariamente richiede un passo pala più alto rispetto a quello richiesto nelle simulazioni con Cp-Lambda per ottenere la stessa velocità di rotazione del rotore.

La prova di quanto appena descritto è mostrata nell'analisi seguente. Sono state effettuate le stesse simulazioni in Cp-Lambda incrementando la rigidità torsionale della pala di un fattore 10^2 . Per questo caso si riportano in Figura 33 le differenze percentuali delle velocità di rotazione del rotore e degli angoli di passo pala.

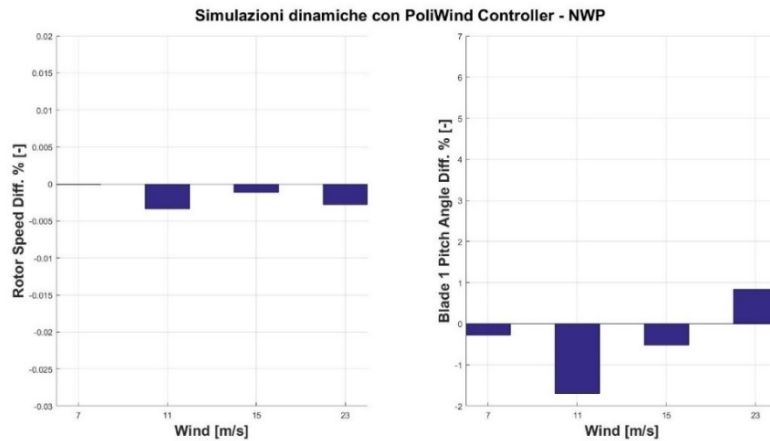


Figura 33(a,b) - Differenze percentuali di velocità di rotazione del rotore(a) e passo pala(b) tra FAST e Cp-Lambda (Pala del modello Cp-Lambda irrigidita a torsione)

Come si evince dalla figura appena presentata le differenze sull'angolo di passo pala si riducono al di sotto del 2% e viene dimostrato dunque che la differenza riscontrata in precedenza è da attribuirsi ai differenti modelli strutturali utilizzati dei due codici.

Curva di potenza

Al fine di fornire una valutazione completa della curva di potenza sono state esaminate diverse velocità di vento tali da coprire tutto il range operativo della macchina, ovvero dai 3 m/s di *Cut-In* ai 23 m/s, velocità prossima alla velocità di *Cut-Out*.

Per ottenere un valore rappresentativo di ciascuna simulazione, è stata presa la media della potenza erogata negli ultimi 50 dei 100 secondi di simulazione.

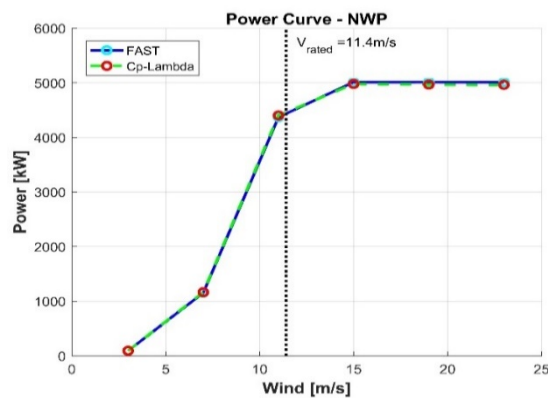


Figura 34 - NWP - Curva di potenza

Si riportano le differenze percentuali delle potenze erogate dai due modelli per ciascuna simulazione.

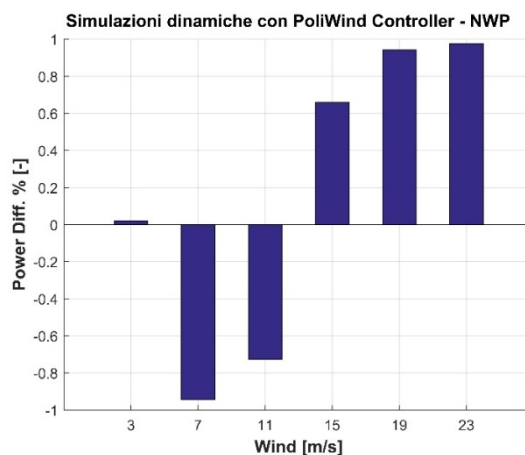


Figura 35 - NWP - Differenze percentuali di potenza erogata tra FAST e Cp-Lambda

Come si evince da Figura 34 e Figura 35, la potenza erogata in regione III è prossima ai 5 MW nominali di progetto con differenze tra i due codici inferiori all'1% provando dunque la bontà dello schema di controllo implementato.

Grazie all'analisi dei risultati esposti in questo paragrafo in termini di velocità di rotazione del rotore, passo pala e potenza erogata si dimostra il corretto funzionamento del sistema di controllo PoliWindController applicato a FAST. Il risultato è significativo poiché è da sottolineare che la taratura dell'LQR avviene su un modello ridotto di aerogeneratore a 6 stati e 2 input costruito con Cp-Lambda.

4.2.2. Confronto modelli FAST – Cp-Lambda

Le simulazioni NWP effettuate sono utili anche per svolgere una comparazione delle risposte dinamiche dei modelli FAST e Cp-Lambda. Viene sviluppato il confronto per le differenti velocità di vento dei valori medi e deviazioni standard dei valori di alcuni sensori. Sono stati scelti per questa analisi i sensori relativi ai momenti flettenti in radice della pala (ritardo e flapping), sulla piattaforma (momento di rollio e beccheggio) e alla base del pilone di supporto (momento di rollio e beccheggio).

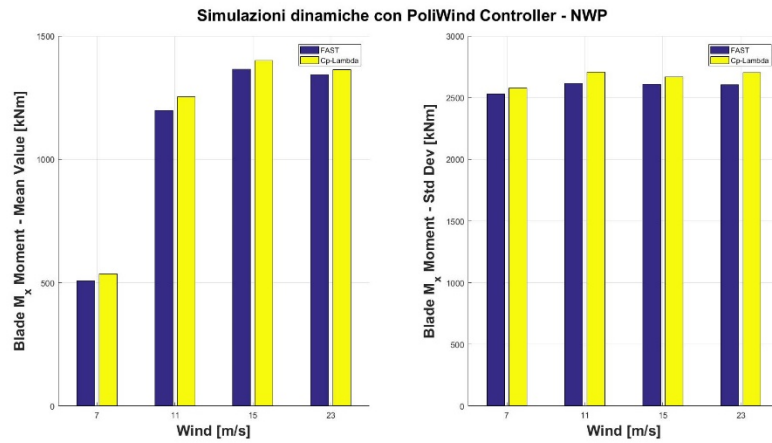


Figura 36 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di ritardo in radice pala

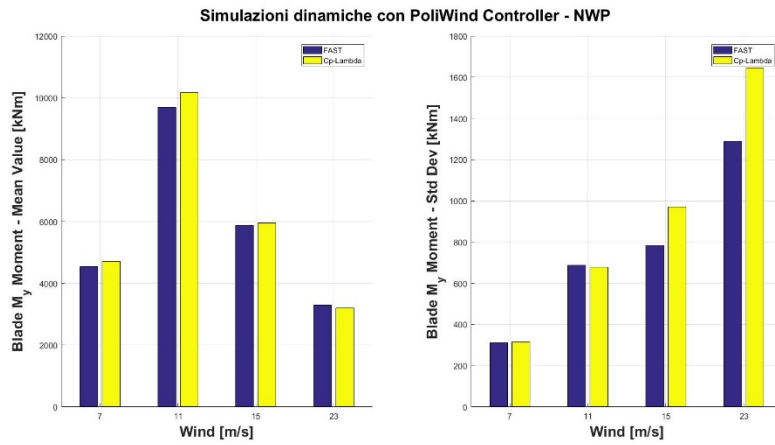


Figura 37 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di flappeggio in radice pala

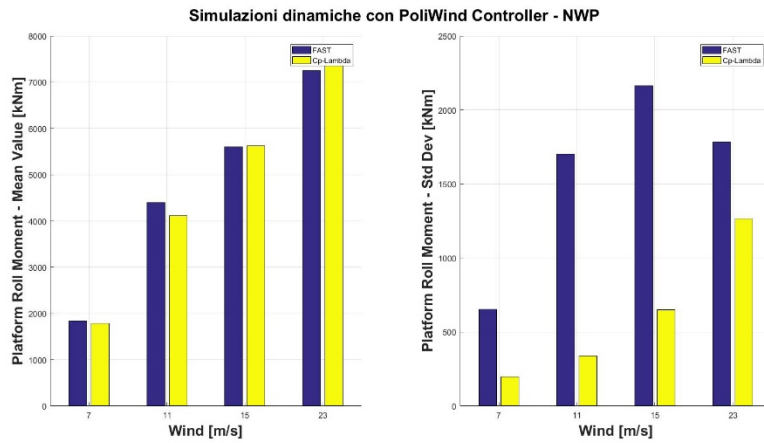


Figura 38 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di rollio della piattaforma

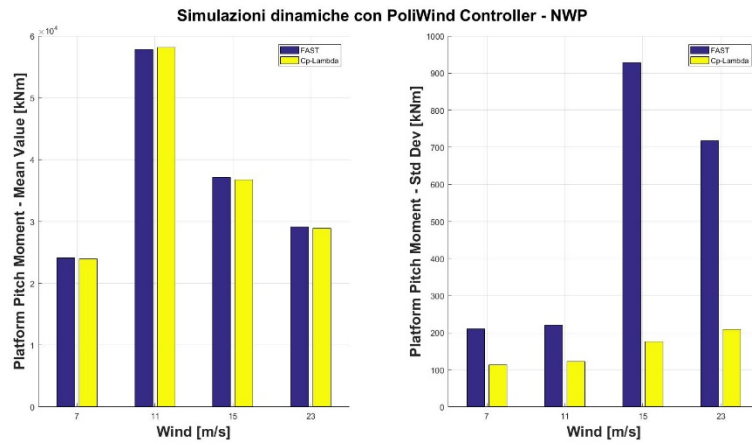


Figura 39 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di beccheggio della piattaforma

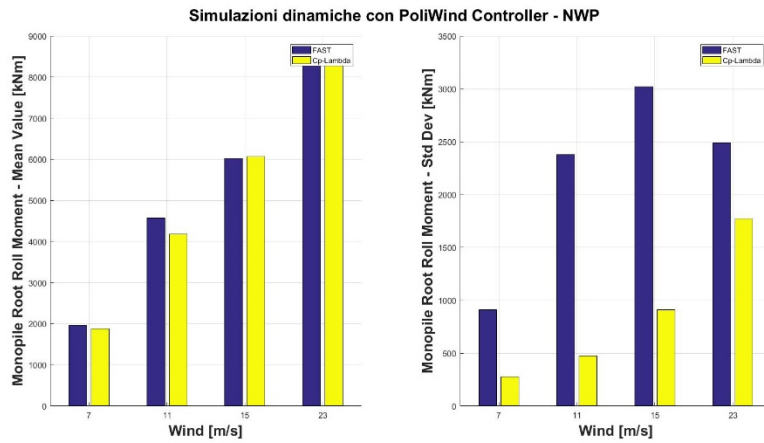


Figura 40 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di rollio a base monopile

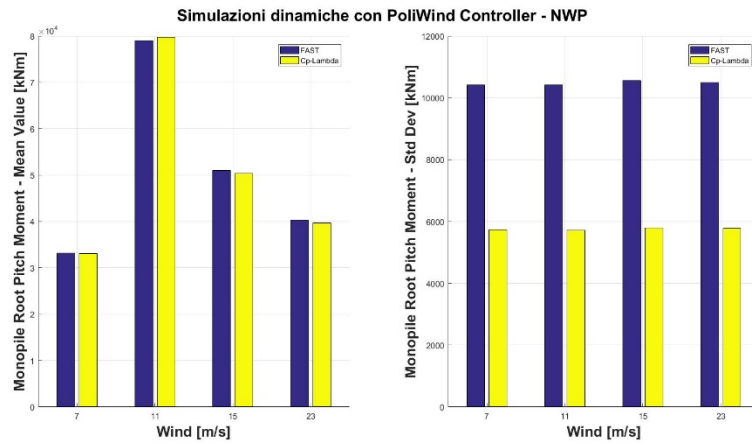


Figura 41 - NWP – Valori medi e deviazioni standard per diverse velocità di vento del momento di beccheggio a base monopile

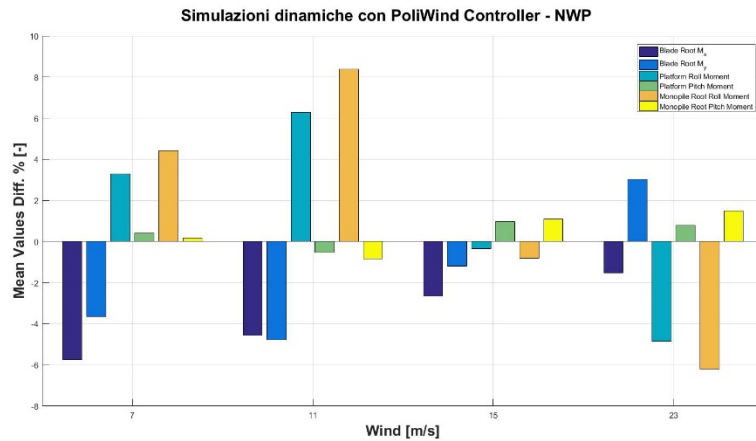


Figura 42 - NWP – Differenze percentuali dei valori medi dei momenti flettenti

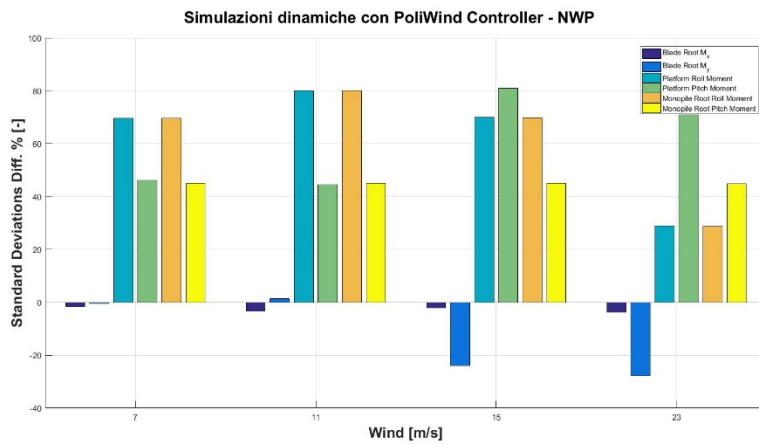


Figura 43 - NWP – Differenze percentuali delle deviazioni standard dei momenti flettenti

La Figura 42 e la Figura 43 mostrano le differenze percentuali dei valori medi e delle deviazioni standard dei valori provenienti dai sensori in esame sintetizzando quanto evidenziato nelle figure precedenti.

In generale, le differenze percentuali dei valori medi sono inferiori al 10% dimostrando un discreto grado di correlazione tra i due modelli.

Nel dettaglio, si nota come la dinamica della pala sia congruente tra i due codici: in termini di valori medi le differenze percentuali sono contenute al di sotto del 5%, evidenziando differenze sensibili solo nelle deviazioni standard per alti venti.

Le differenze più marcate riguardano la dinamica della piattaforma e, in generale, della struttura di supporto. Poiché la storia temporale delle onde è la stessa per entrambi i codici e i carichi idrodinamici sono valutati tramite la teoria di Morison sia in FAST che in Cp-Lambda, le discrepanze che emergono sono da imputarsi alle differenti modellazione della struttura sommersa. Per spiegare questa difformità di risultati è necessario entrare nel dettaglio del solutore presente in SubDyn¹⁴.

Per risolvere la dinamica strutturale SubDyn mette a disposizione il metodo di riduzione di Craig-Bampton. Attraverso questo metodo il modello ad elementi finiti della *sub-structure* viene trasformato in un modello ad un numero drasticamente ridotto di gradi di libertà che mantiene la stessa risposta dinamica alle basse frequenze del modello completo. Affinché il calcolo sia accurato, tra i modi da comprendere nella modellazione è necessario che siano presenti i modi assiali al fine di tener conto correttamente dei carichi dovuti al peso della *sub-structure* stessa. L'inclusione di questi modi potrebbe portare il modello ridotto ad avere comunque un numero consistente di gradi di libertà, limitando dunque il vantaggio dell'utilizzo della riduzione di Craig-Bampton. Il corretto numero di modi da comprendere nella riduzione è pertanto fondamentale.

Il metodo di riduzione di Craig-Bampton è dunque un metodo certamente potente ma che richiede di prestare molta attenzione alla sua taratura e pertanto non è di immediato utilizzo. Per ovviare alle difficoltà di impostazione di tale metodo, FAST mette a disposizione una semplificazione. Tramite l'approssimazione di Guyan è infatti possibile escludere tutti i modi dalla riduzione Craig-Bampton effettuando di fatto una riduzione statica della struttura, soluzione scelta per le analisi condotte. Questa approssimazione potrebbe essere la fonte principale delle discrepanze tra i risultati forniti dai due codici nelle simulazioni NWP effettuate.

¹⁴ La teoria riportata del modulo SubDyn è presente nella documentazione di riferimento [19].

4.3. DLC 1.5

Genericamente le DLCs (*Dynamic Load Cases*) rappresentano diverse condizioni operative della macchina certificate secondo la normativa IEC 61400-1. Tra queste, la DLC 1.5 prevede una raffica orizzontale (EOG, *Extreme Operating Gust*) alla quale fa seguito l'improvvisa perdita del controllo (*Grid Loss*).

La EOG per il caso in questione fa riferimento ad una raffica di 10 secondi con periodo di ritorno di 1 anno (EOG_1) ed è rappresentata in Figura 44 per una condizione iniziale di 11 m/s.

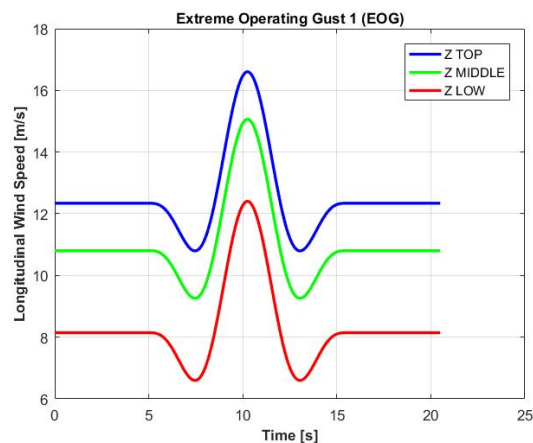


Figura 44 - EOG_1 con vento di riferimento pari a 11 m/s

Per simulare la perdita del controllo si fa ricorso alla funzione di Supervisore di Poli-WindController. Come riportato nel paragrafo 2.1.3, attraverso il parametro *GridFailTime* è infatti possibile impostare il tempo in cui si presenta il guasto. A partire dall'istante appena definito, la macchina passa allo stato operativo corrispondente allo spegnimento di emergenza con generatore disconnesso ($iState = 3$).

La raffica viene imposta a partire da 15 secondi dall'inizio della simulazione, tempo necessario alla macchina per raggiungere la condizione di regime. Il guasto viene simulato a 19.5 secondi, ovvero poco prima che la raffica abbia raggiunto la velocità

massima. La Figura 45 mostra la storia temporale del vento riferito al centro dell'hub e l'istante in cui si verifica la perdita del controllo.

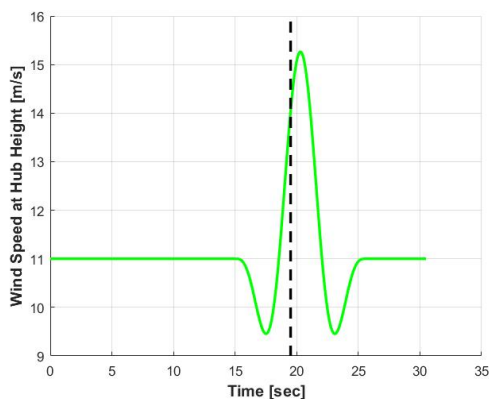


Figura 45 - DLC 1.5 11 m/s. Storia temporale della velocità del vento che investe l'hub con perdita del controllo

L'analisi ha l'obiettivo di valutare il corretto funzionamento del Supervisore applicato ai codici di simulazione Cp-Lambda e FAST. Di seguito si riportano le storie temporali di alcuni dei sensori.

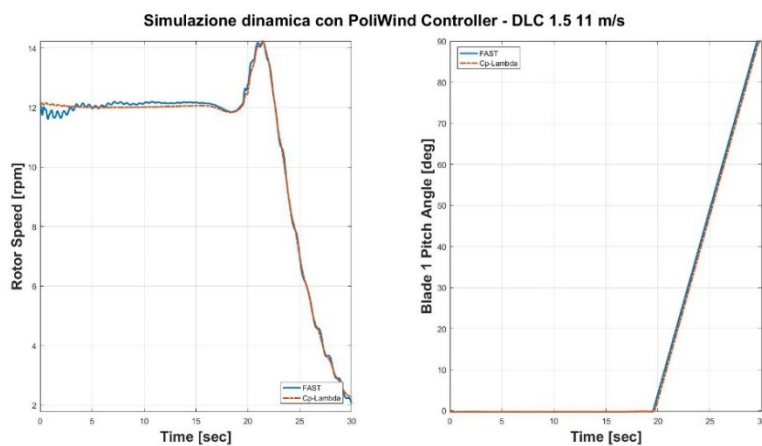


Figura 46 - DLC 1.5 11 m/s. Velocità di rotazione del rotore e passo pala

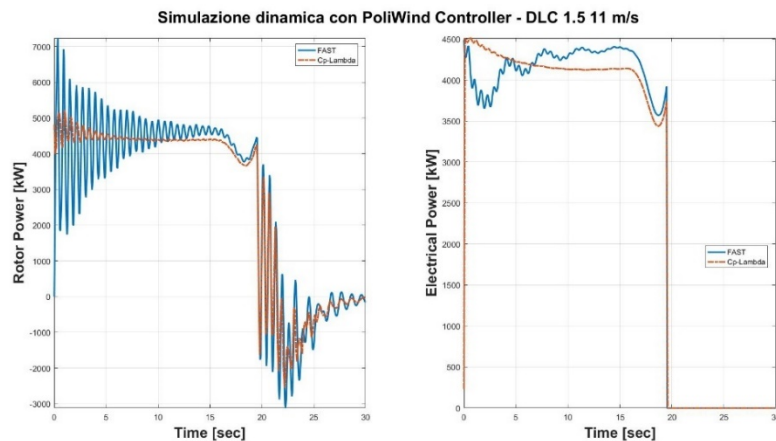


Figura 47 - DLC 1.5 11 m/s. Potenza aerodinamica del rotore e potenza elettrica

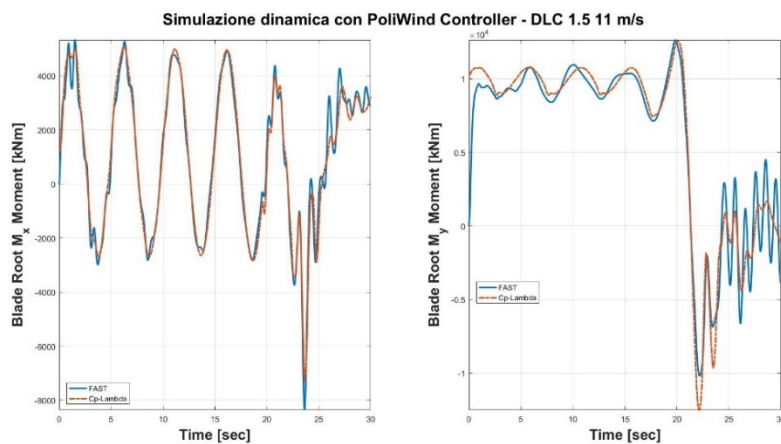


Figura 48 - DLC 1.5 11 m/s. Momento flettente in radice pala a ritardo e flappeggio

Il confronto riportato nelle figure precedenti indica come il Supervisore esegua correttamente le operazioni. Si nota infatti come il generatore venga disconnesso e contemporaneamente le pale vengano portate ad un valore di passo pari a 90° , ovvero “in bandiera”. Inoltre anche il calcolo dei carichi a radice pala presenta un ottimo grado di correlazione come sottolineato dalle storie temporali dei relativi sensori e come già evidenziato nelle simulazioni NWP.

Quanto appena analizzato è la dimostrazione di come PoliWindController sia compatibile nel suo complesso anche con il codice FAST.

CAPITOLO 5

STUDIO

DELL'ACCOPPIAMENTO

Cp-Lambda – FAST

In questo capitolo si descrive come i due codici sono stati modificati in modo da poter comunicare tra loro con lo scopo di effettuare co-simulazioni in ambiente *offshore*. Verranno svolte alcune prove che hanno lo scopo di validare le modifiche apportate ai codici.

5.1. Strategia di impiego dei codici

L'analisi di un aerogeneratore per applicazioni *offshore* in Cp-Lambda è limitata solamente alla modellazione di una struttura di supporto composta da semplice pilone. Verrà dunque effettuato lo studio dell'accoppiamento per il modello *fixed-bottom monopile* per permettere un confronto con i dati già in possesso ottenuti dalle simulazioni con Cp-Lambda e con FAST.

Inizialmente verrà studiata la logica con cui opera FAST in modo da essere in grado di estrarre correttamente il blocco relativo alla modellazione e al calcolo delle strutture di supporto in ambiente *offshore*.

Successivamente si presenterà come Cp-Lambda possa interfacciarsi a tale blocco apportando le opportune modifiche al modello.

Infine verrà studiato un modo per permettere ai due codici di comunicare. La funzione di *linker* tra i due programmi verrà assegnata a PoliWindController essendo questo un codice già perfettamente interfacciato con Cp-Lambda.

5.1.1. FAST

Si riporta la Figura 7 raffigurante lo schema di funzionamento di FAST per il modello *fixed-bottom monopile*. La modalità *glue-code* permette al programma di tenere separati i singoli moduli ai quali è adibita una definita funzione. In questo modo viene lasciato al *driver* il compito di coordinare la simulazione effettuando il passaggio di dati tra essi, rappresentato dalle frecce, e richiamare i solutori.

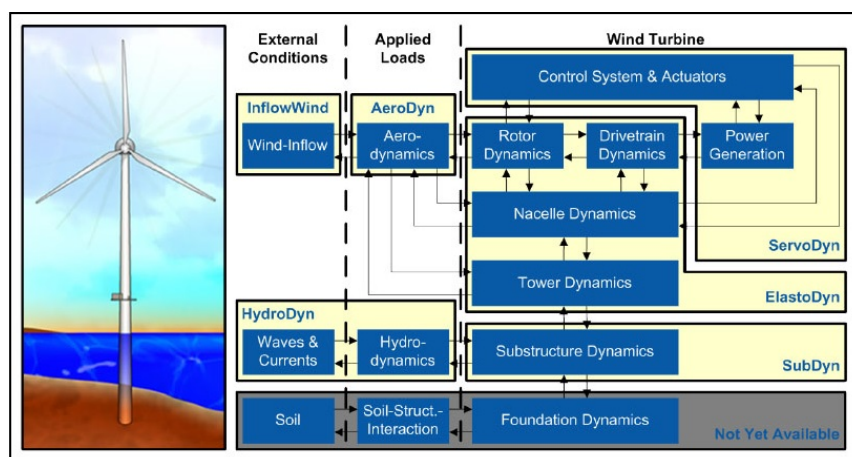


Figura 49 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom [8]

L'obiettivo è di attribuire a FAST la modellazione della sola parte di struttura bagnata. Per adempiere a tale scopo, i moduli che è necessario isolare per il modello *monopile* sono HydroDyn e SubDyn, come mostrato in Figura 50.

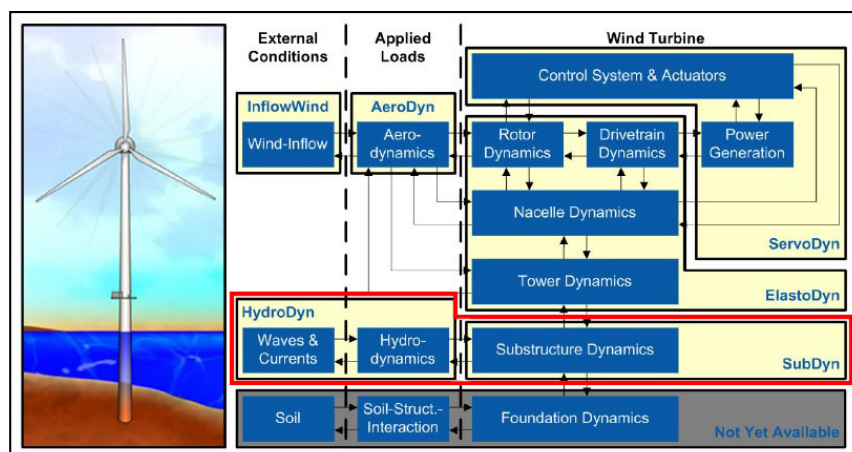


Figura 50 - Schematizzazione FAST per applicazione offshore fixed-bottom: HydroDyn e SubDyn

Come già accennato nel Paragrafo 2.1.2, HydroDyn è il modulo che si occupa di determinare la storia temporale del moto ondoso e i carichi idrodinamici agenti sulla struttura immersa. SubDyn è invece il modulo che accoppia il modello dell'aerogeneratore a strutture di supporto flessibili per applicazione *fixed-bottom* (quali ad esempio semplici piloni, tripodi, strutture reticolari, ecc.) tramite sotto-strutturazione studiandone la dinamica. Questi due moduli comunicano tra loro scambiandosi i carichi che agiscono sulla struttura bagnata e la cinematica dei punti che la descrivono.

Per poter isolare HydroDyn e SubDyn è dunque necessario capire come il blocco che compongono interagisca con il resto del programma. Il modello completo di aerogeneratore può essere diviso in due sottosistemi identificando nella piattaforma il punto di interfaccia tra la parte di modello aero-servo-elastico adibita ai moduli AeroDyn, ServoDyn ed ElastoDyn e la parte di modello idro-elastico, *sub-structure*, adibita al blocco HydroDyn-SubDyn.

La piattaforma, denominata all'interno del solutore *transition piece*, viene modellata in FAST come un corpo rigido a 6 gradi di libertà, mostrati in Figura 51. Essa svolge il ruolo chiave di sintetizzare quanto provenga dal modello aero-servo-elastico attraverso la sua cinematica e quanto provenga dal modello idro-elastico attraverso i carichi che agiscono su di essa.

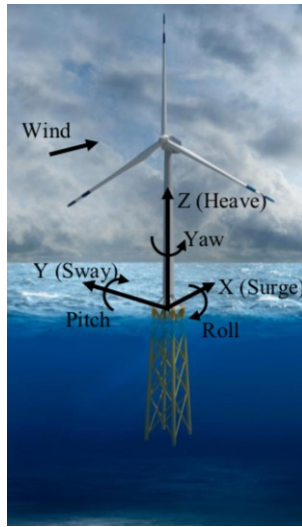


Figura 51 - Gradi di libertà della piattaforma nel sistema di riferimento inerziale FAST

In dettaglio, la Figura 52 mostra il flusso di dati dettato dal *driver* con particolare riferimento agli *input* e *output* di HydroDyn e SubDyn.

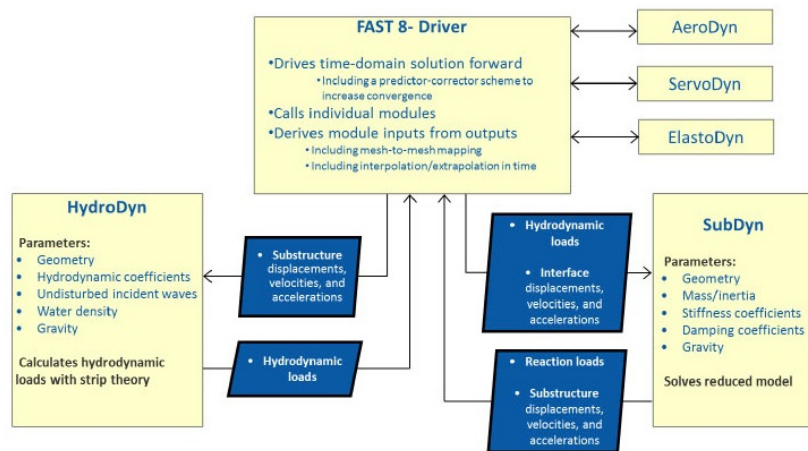


Figura 52 - Rappresentazione del flusso di dati tra i due modelli aero-servo-elastico e idro-elastico [8]

Per quanto riguarda lo scambio dati tra i due sottosistemi, il *driver* ha il compito di passare a HydroDyn e SubDyn la cinematica del punto di interfaccia proveniente dal calcolo del modello aero-servo-elastico e di trasferire a quest'ultimo i carichi sulla piattaforma provenienti dal calcolo idro-elastico. Per quanto riguarda lo scambio dati

all'interno del blocco idro-elastico, il *driver* ha il compito di gestire la comunicazione tra HydroDyn e SubDyn:

- HydroDyn riceve in ingresso posizione, velocità e accelerazione dei punti che descrivono la struttura sommersa provenienti da SubDyn e restituisce i carichi idrodinamici agenti su essi sulla base del moto ondoso e del movimento della stessa.
- SubDyn riceve in ingresso i carichi idrodinamici provenienti da HydroDyn che agiscono sui punti che descrivono il modello idro-elastico e ne restituisce la cinematica.

La Tabella 16 sintetizza quanto appena descritto. In rosso e verde viene rappresentato lo scambio dati a livello dei due sottosistemi, ovvero all'interfaccia (*transition piece*), e in viola e celeste lo scambio dati a livello del sottosistema idro-elastico (*sub-structure*).

Tabella 16 - Input e Output di HydroDyn e SubDyn

	INPUT		OUTPUT	
	Transition piece	Sub-structure	Transition piece	Sub-structure
HydroDyn	Cinematica	Cinematica	Carichi idrodinamici	Carichi idrodinamici
SubDyn	Cinematica	Carichi idrodinamici	Carichi strutturali	Cinematica

5.1.2. Cp-Lambda

Il modello aero-servo-elastico di Cp-Lambda deve essere in grado di fornire alla *sub-structure* la cinematica del *transition piece* a seguito delle forze che agiscono su di esso provenienti dal calcolo idro-elastico. Come in FAST, anche in Cp-Lambda la piattaforma viene modellata tramite un corpo rigido a base torre.

Per garantire i 6 GDL della piattaforma si fa ricorso alla vasta gamma di elementi presenti nella libreria di Cp-Lambda. Ad essa vengono collegati in serie 6 giunti, uno per

ciascun grado di libertà. Rispetto dunque al modello Cp-Lambda con pilone di supporto, il *monopile* viene sostituito da 3 giunti prismatici e 3 giunti di rivoluzione orientati nel sistema di riferimento inerziale di FAST, come descritto in Tabella 17.

Tabella 17 - Descrizione giunti Cp-Lambda

	Grado di libertà	Orientazione asse
Giunti prismatici	Surge	X – Direzione vento
	Sway	Y – Terna destrorsa
	Heave	Z – Asse torre
Giunti di rivoluzione	Roll	X – Direzione vento
	Pitch	Y – Terna destrorsa
	Yaw	Z – Asse torre

Fornire a FAST la cinematica del *transition piece*, vuol dire ricavare dal modello aero-servo-elastico spostamenti, velocità e accelerazioni della piattaforma. A tal fine vengono sfruttati i sensori.

Cp-Lambda permette di posizionare dei sensori di spostamento e velocità in qualsiasi punto del modello. Inoltre permette di applicare dei sensori all'interno dei giunti, misurando in questo modo lo spostamento relativo tra le componenti collegate ad esso. Per ottenere dunque la cinematica della piattaforma si è scelto di posizionare dei sensori di spostamento relativo all'interno di ciascun giunto e dei sensori di velocità sul corpo rigido che modella la piattaforma. Cp-Lambda d'altro canto non permette la misura diretta delle accelerazioni. Per ricavarle si utilizza la funzione implementata nel codice che esegue il calcolo delle derivate dei valori provenienti da qualsivoglia sensore. Pertanto nel caso in esame le accelerazioni vengono ottenute come derivate dei valori misurati dai sensori di velocità.

Per poter applicare al modello aero-servo-elastico le forze provenienti dal sottosistema idro-elastico si sfrutta ancora una volta la versatilità di modellazione propria di Cp-Lambda. All'interno dei giunti è infatti possibile modellare attuatori sia di spostamento che di forza. Dunque, all'interno dei giunti prismatici vengono posizionati attuatori di forza lineari mentre all'interno dei giunti di rivoluzione vengono posizionati attuatori di coppia. Dato che le forze che devono essere applicate al modello Cp-

Lambda sono le reazioni interne della *sub-structure*, agli attuatori è stata nascosta qualsiasi tipo di dinamica selezionando attuatori del prim'ordine a costante di tempo nulla.

Il modello appena descritto è diventato un modello aero-servo-elastico del quale si può misurare la cinematica della piattaforma relativa ai 6 gradi di libertà che la definiscono e al quale è possibile applicare forze e momenti derivanti da un sottosistema idro-elastico.

5.1.3. Linker

Il risultato dello studio dei due codici appena effettuato può essere riassunto in Figura 53. Come in FAST è presente un *driver* che svolge il compito di trasferire i dati tra i moduli e richiamarne i solutori, anche per effettuare l'accoppiamento tra Cp-Lambda e il blocco HydroDyn-SubDyn è necessario che vi sia un mezzo di comunicazione, ovvero un *linker*, atto a passare i dati tra i due sottosistemi.

A tal fine, si utilizza PoliWindController. Il codice è perfettamente interfacciato con Cp-Lambda, il quale lo interroga ad intervalli di tempo definiti dal *communication interval* per far svolgere ad esso il compito del controllo della macchina. I due codici si scambiano le informazioni tramite lo *swap array*: Cp-Lambda fornisce al Controller i valori dei sensori ad esso necessari e sulla base di questi e dello schema di controllo il Controller restituisce i comandi da attuare. È dunque immediato arricchire lo *swap array* con i valori provenienti dai sensori relativi alla cinematica della piattaforma, come elencato nella Tabella 31 in Appendice C.

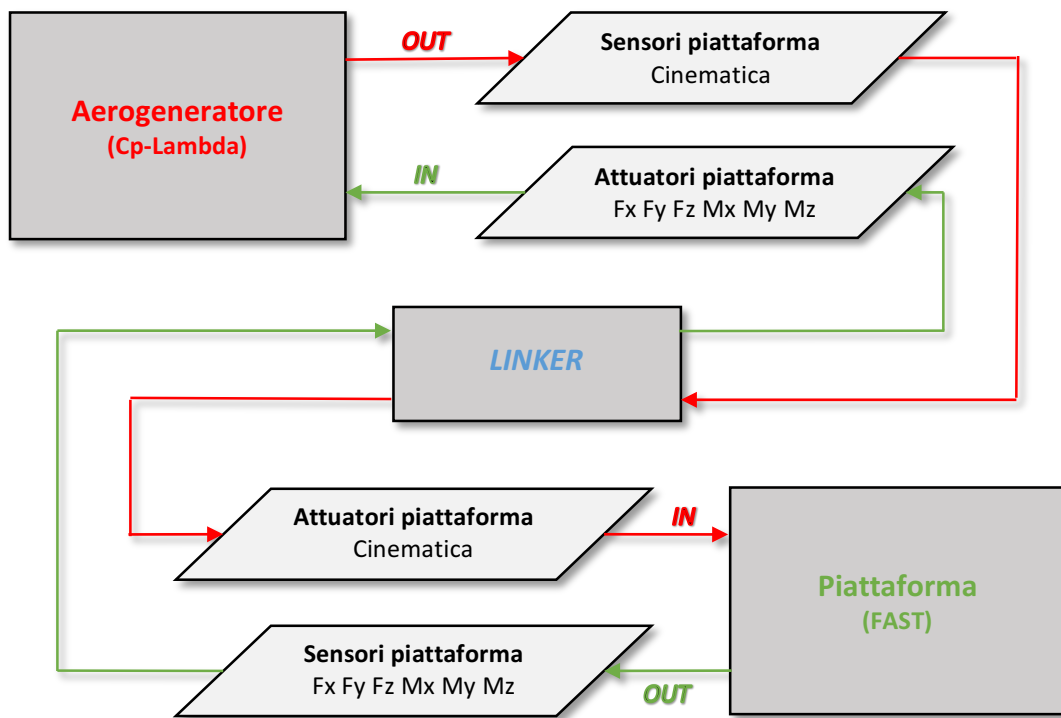


Figura 53 - Schema di accoppiamento Cp-Lambda - FAST tramite linker [7]

Per far sì che PoliWindController possa svolgere la funzione di *linker*, è necessario apportare alcune modifiche al codice. Bisogna ovvero assicurarsi che sia in grado di richiamare il solutore idro-elastico. La maniera più semplice è rendere il blocco HydroDyn-SubDyn anch'esso una libreria dinamica interfacciata con esso tramite lo *swap array*. In questo modo PoliWindController non svolge più solamente la funzione di controllo della macchina: ogni qualvolta richiamato da Cp-Lambda, esso dovrà interrogare a sua volta il solutore idro-elastico.

La DLL relativa a FAST dovrà ricavare le misure ad essa necessarie dallo *swap array*, effettuare i suoi conti, ed infine fornire gli *output* posizionandoli nello *swap array* nelle posizioni mostrate nella Tabella 32 in Appendice C. Nel caso in cui la DLL venga chiamata per la prima volta, essa dovrà svolgere l'inizializzazione esattamente come la effettuerebbe la versione eseguibile di FAST: il *driver* del blocco HydroDyn-SubDyn chiamerà le subroutine di inizializzazione dei moduli costruendo così il modello idro-elastico e generando la storia di onde da utilizzare durante la simulazione.

Gli *output* della DLL di FAST corrispondono ai valori di forza valutati al *transition piece* che è necessario imporre al sottosistema aero-servo-elastico. Come presentato nel paragrafo precedente, Cp-Lambda dà l'opportunità di modellare attuatori di forza. Allo stesso modo in cui il codice aeroelastico applica la coppia al generatore valutata dal sistema di controllo, così esso imporrà le forze negli attuatori a base torre con i valori presenti nello *swap array*.

Una volta descritto il processo, è possibile sintetizzarlo nello schema di Figura 54.

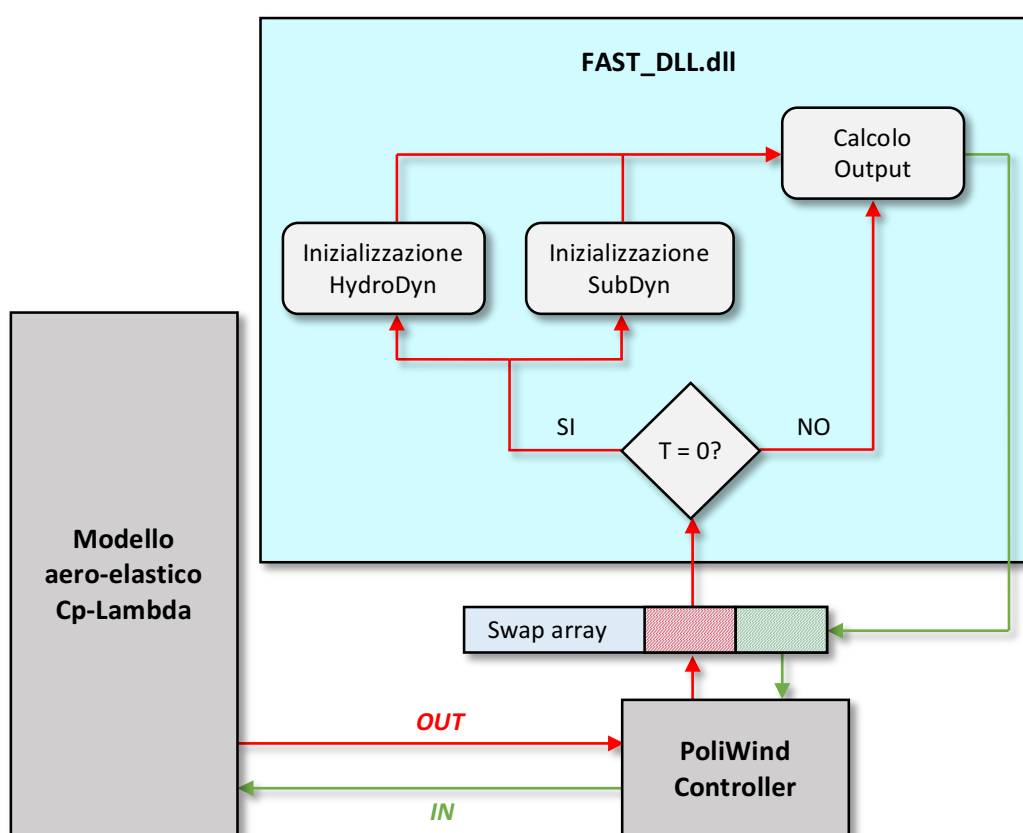


Figura 54 - Schema funzionale della simulazione Cp-Lambda - FAST

5.2. Modifiche apportate ai codici

Il procedimento seguito per arrivare ad un accoppiamento completo dei due codici è stato diviso per gradi in modo da controllare e validare i vari passaggi:

- Modifica al codice FAST:

- Realizzazione di una versione del codice in formato eseguibile in grado di ricevere in *input* le storie temporali della cinematica della piattaforma e valutare la dinamica della struttura di supporto;
- Conversione in formato libreria dinamica del codice precedentemente modificato e successiva implementazione di una funzione in PoliWindController in grado di richiamarla.

- Modifiche al modello Cp-Lambda:

- Inserimento giunti in sostituzione al *monopile* e modellazione attuatori;
- Comando degli attuatori tramite PoliWindController.

5.2.1. Modifiche al codice FAST

Versione eseguibile: FAST red.exe

L'esigenza di utilizzare FAST esclusivamente come solutore idro-elastico si traduce nel dover isolare il blocco composto da HydroDyn e SubDyn dal resto del programma. A tale scopo è necessario modificare il codice in modo che il processo di calcolo possa ridursi alla sola interrogazione dei moduli in questione. L'architettura di FAST gioca un ruolo fondamentale in questo senso. Infatti grazie alla sua modularizzazione è possibile chiedere al codice in fase di impostazione del calcolo di chiamare solamente HydroDyn e SubDyn.

La modalità di funzionamento *glue-code* di FAST è formulata in modo tale che i carichi e le risposte dinamiche sono trasferiti dal *driver* non solo tra HydroDyn e SubDyn ma anche tra questi ed ElastoDyn. Come accennato nel Paragrafo 2.1.2, ElastoDyn è l'unico dei moduli presenti che non può essere disattivato. Nella modalità *glue-code* è infatti ad esso adibita la funzione del calcolo della dinamica strutturale del *transition piece*, della torre e del gruppo rotore-navicella. Appare chiaro come nella strategia di accoppiamento Cp-Lambda – FAST la dinamica strutturale calcolata dal codice della NREL non serva, in quanto la parte di modello aero-servo-elastico viene modellata in Cp-Lambda.

Per ottenere un codice puramente idro-elastico bisogna dunque intervenire sul codice sorgente di FAST in modo che possa essere escluso qualsiasi richiamo del *driver* alle subroutine di ElastoDyn. Inoltre, in FAST le relazioni *input-output* tra accelerazioni e carichi all'interno dei moduli ElastoDyn-HydroDyn-SubDyn sono risolte tramite una matrice Jacobiano costruita per differenze finite. Pertanto è necessario modificare anche la subroutine che calcola questa matrice escludendo la parte relativa ad ElastoDyn. Viene compilata così una versione di FAST "*ridotta*" in formato eseguibile: *FAST_red.exe*. Di fatto questa versione conserva la modalità *glue-code* del codice completo richiamando però solamente le funzioni dei moduli HydroDyn e SubDyn.

Per permettere l'esecuzione del programma anche in assenza del modulo ElastoDyn, è necessario che esso venga sostituito in qualche modo. A tal fine si sfrutta quanto si ha già in possesso. Avendo infatti effettuato simulazioni NWP del modello *offshore*, si hanno a disposizione tutte le quantità calcolate dal modulo in questione. Si è scelto dunque di aggiungere al *driver* una funzione che legga il file testo denominato "*Ptfm-MotionsTimeHistories.dat*" contenente le quantità relative alla cinematica della piattaforma che sono richieste in *input* dal solutore idro-elastico. Il flusso di dati che avviene nel codice modificato *FAST_red.exe* è rappresentato in Figura 55.

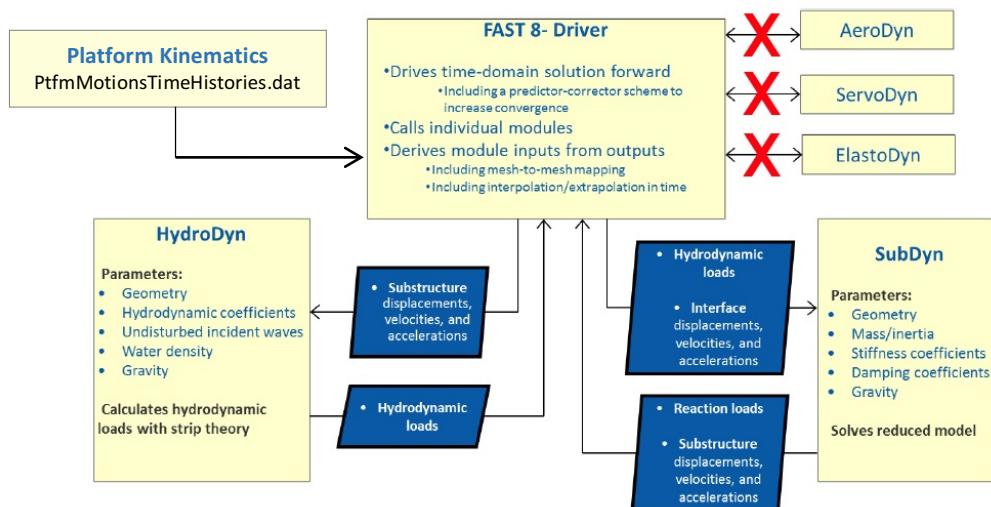


Figura 55 - Rappresentazione del flusso di dati in FAST_red.exe

Una volta eseguito il nuovo codice, si esegue una comparazione dei risultati di questa versione con quelli provenienti dalle simulazioni NWP:

- La Figura 56 e Figura 57 la confrontano la cinematica della piattaforma per verificare che gli *input* siano stati forniti in modo corretto;
- La Figura 58 e la Figura 59 confrontano i carichi per verificare che il blocco HydroDyn-SubDyn sia stato implementato correttamente.

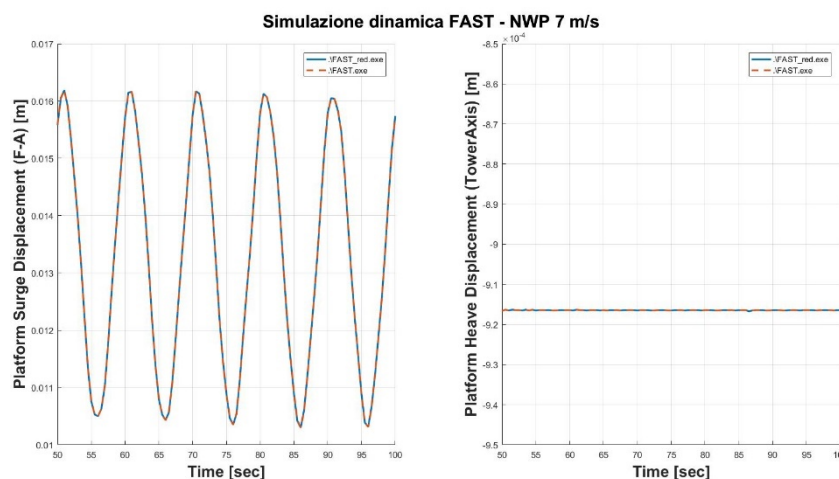
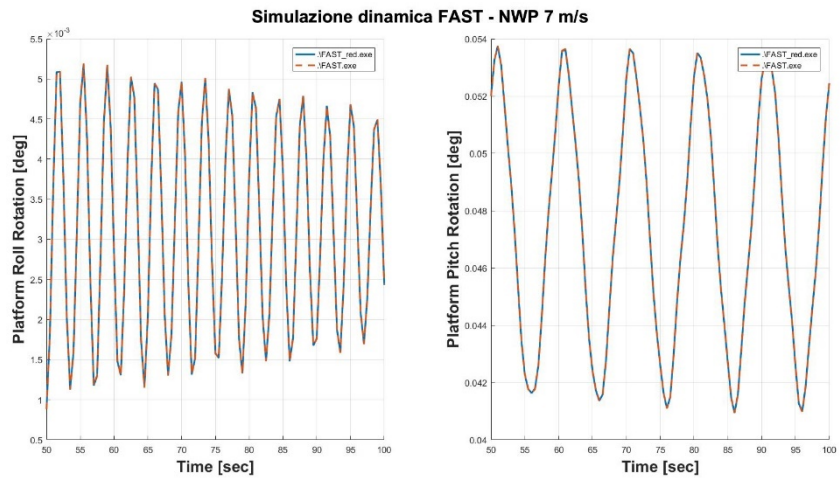
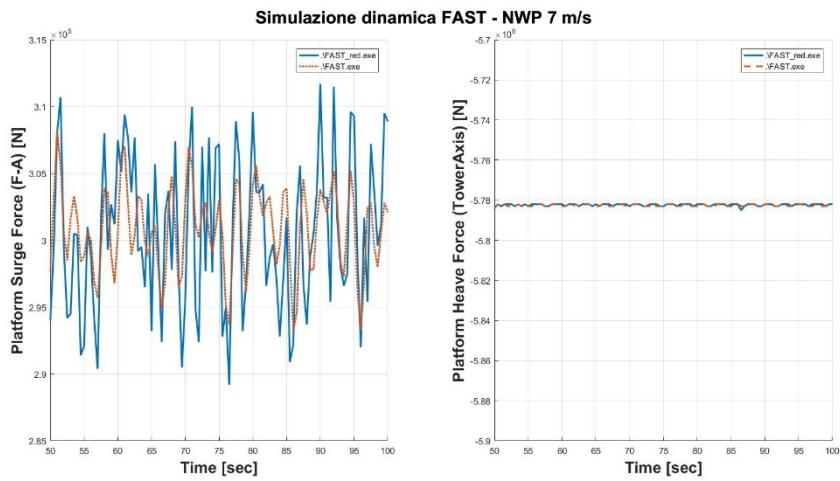


Figura 56 - Spostamento Fore-Aft e verticale della piattaforma: input per FAST_red.exe



*Figura 57 - Rotazione a rollio e beccheggio della piattaforma:
input per FAST_red.exe*



*Figura 58 - Forza in direzione Fore-Aft e verticale sulla piattaforma:
confronto output*

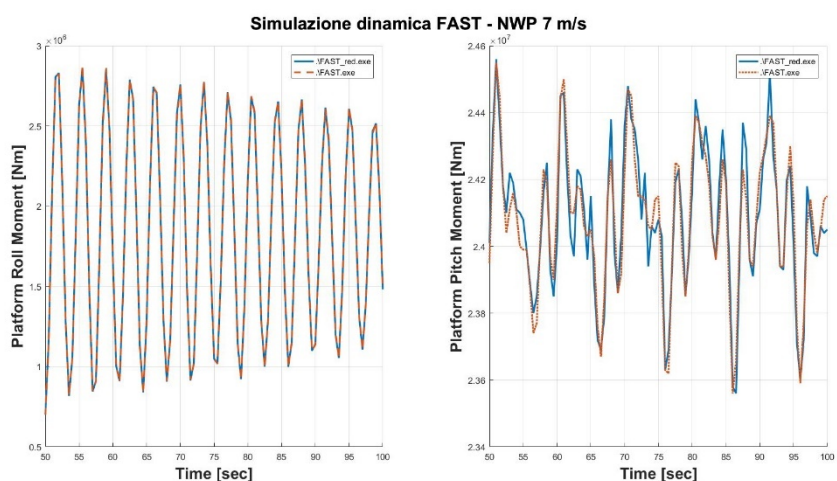


Figura 59 - Momento di rollio e di beccheggio della piattaforma:
confronto output

La perfetta coincidenza delle storie temporali di Figura 56 e Figura 57 mostra come gli *input* forniti alla versione *FAST_red.exe* sono effettivamente coerenti con quanto precalcolato nelle simulazioni NWP.

La Figura 58 e la Figura 59 mostrano i risultati del solutore idro-elastico in termini di carichi agenti sulla piattaforma. L'ottimo grado di comparazione tra le storie temporali raffigurate indica come il blocco HydroDyn-SubDyn sia stato isolato correttamente. Quanto appena riportato evidenzia come il modello aero-servo-elastico possa essere sostituito in FAST fornendo al modello idro-elastico esclusivamente la cinematica della piattaforma.

Versione libreria dinamica: *FAST_DLL.dll*

Il secondo passaggio effettuato prevede la ricompilazione della versione eseguibile *FAST_red.exe* come libreria dinamica. Viene così creata la versione *FAST_DLL.dll* cosìché il solutore idro-elastico possa essere interrogato da una unità esterna, come ad esempio PoliWindController. La ricompilazione in versione libreria dinamica richiede alcune modifiche ulteriori al codice sorgente in quanto gli *input* devono essere estratti dallo *swap array*. A conseguenza di ciò il *main program* di FAST diventa a tutti

gli effetti una subroutine che comunica con PoliWindController attraverso lo *swap* come mostrato nelle tabelle riportate in Appendice C.

Come la versione eseguibile inizializza i moduli non appena il programma viene avviato, così il *driver* dovrà saper riconoscere lo stato della simulazione per effettuare la medesima inizializzazione nel caso in cui la DLL venga chiamata per la prima volta. Lo stato della simulazione è descritto dal parametro mostrato in Tabella 18 già presente nello *swap array* e di cui lo stesso PoliWind si serve per effettuare la sua inizializzazione.

Tabella 18 - Parametro che descrive lo stato della simulazione e sua posizione nello *swap array*

Number	Variable Name	Description
1	iStatus	Status Flag

Per verificare il funzionamento di FAST in versione libreria dinamica ci si è serviti di PoliWindController e Cp-Lambda. Del Controller si è creata una versione che fosse in grado di leggere il file "*PtfmMotionsTimeHistories.dat*", memorizzare le storie temporali presenti al suo interno e di volta in volta chiamare la DLL di FAST fornendo lo *swap array* aggiornato con i valori della cinematica relativi al time step corrente.

La funzione che svolge PoliWindController in questo caso è duplice e separata:

- per Cp-Lambda esegue il controllo della macchina;
- per FAST ha il compito di richiamare *FAST_DLL.dll* fornendo gli *input* memorizzati dal file "*PtfmMotionsTimeHistories.dat*" letto all'inizio della simulazione.

Lo schema funzionale della simulazione architettata in parallelo viene mostrato in Figura 60.

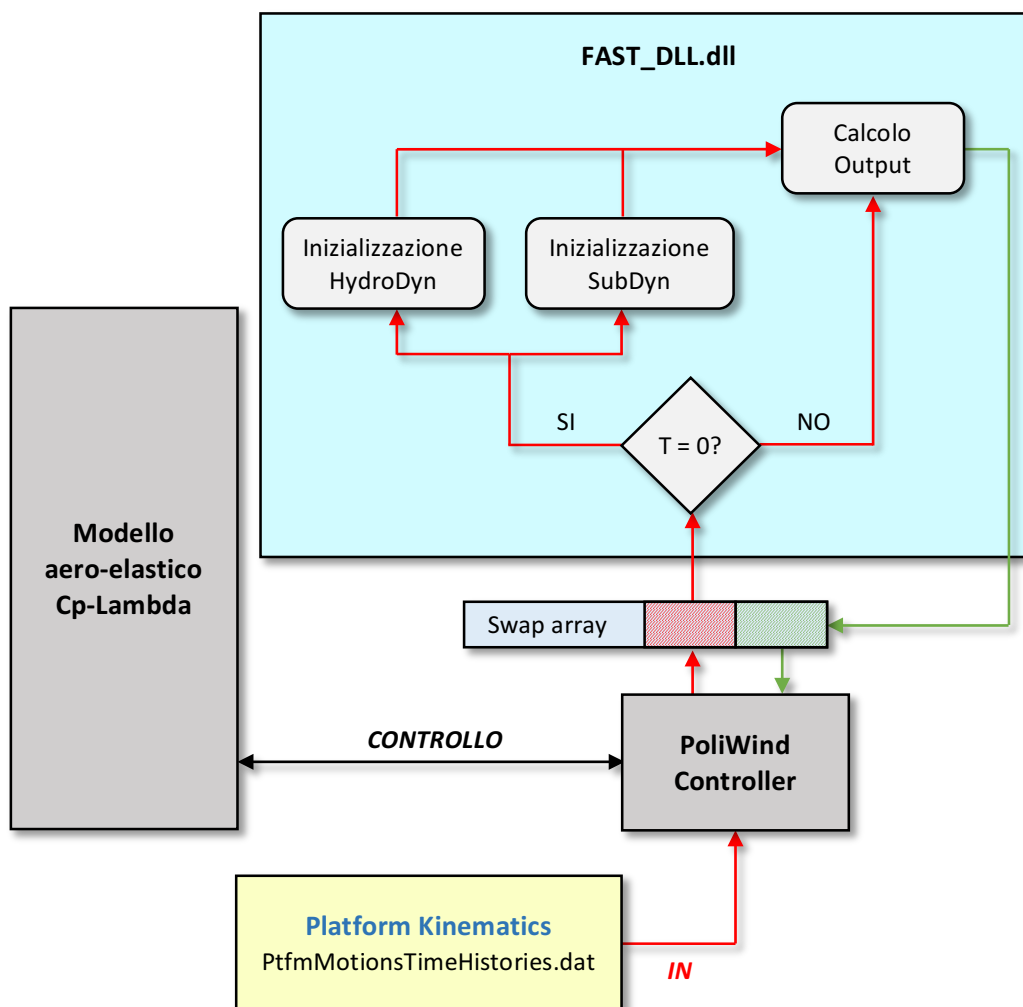


Figura 60 - Schema funzionale della simulazione in parallelo Cp-Lambda – FAST

Quello che si verifica, è che i valori nel file *output* della versione libreria dinamica (*FAST_DLL.dll*) coincidono con i valori nel file *output* della versione *FAST_red.exe* dimostrando dunque il corretto funzionamento anche della libreria dinamica.

5.2.2. Modello Cp-Lambda

La prova che è stata pensata per valutare la risposta del modello Cp-Lambda in presenza degli attuatori prevede diverse semplificazioni. Viene scelto di effettuare una simulazione nel vuoto, ovvero trascurando aerodinamica e gravità, imponendo carichi noti. Per vincolare il modello in attesa che il calcolo arrivi a regime, in ciascuno dei giunti vengono inserite delle molle. I valori delle rigidezze inizialmente molto elevati, vengono gradualmente resi nulli lasciando il compito di tenere in equilibrio il sistema ai soli attuatori presenti a base torre.

In questo caso si ha l'applicazione di un carico verticale in cima torre di valore costante per tutta la simulazione, a simulare l'azione del peso della macchina. L'unico grado di libertà che viene liberato è il GDL relativo alla traslazione verticale, ovvero l'*Heave*.

L'attuatore relativo al giunto prismatico corrispondente viene comandato da Poli-WindController. Per contrastare l'azione del carico, si impone all'attuatore di fornire un valore di forza uguale e contrario al carico applicato in cima torre. La rappresentazione delle condizioni in cui è effettuata la simulazione è esposta nei grafici di Figura 61.

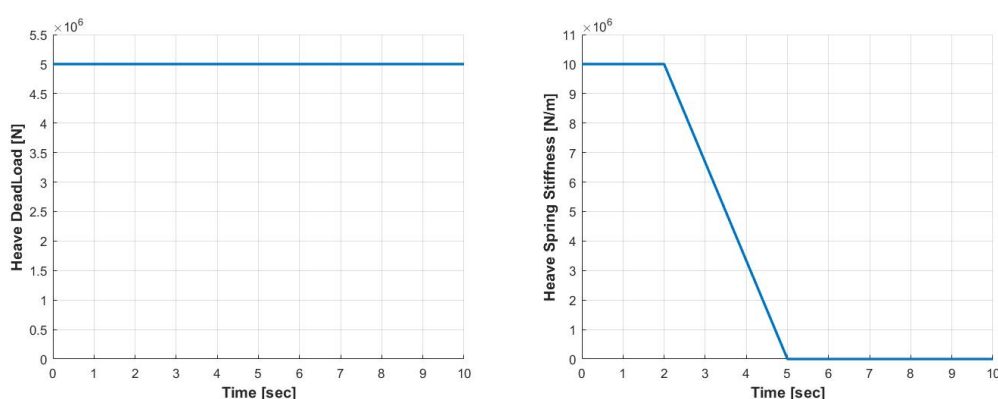


Figura 61(a,b) - (a) Carico verticale applicato; (b) Valore della rigidezza della molla

Il corretto comando dell'attuatore porta il sistema a rimanere in equilibrio anche in assenza della molla.

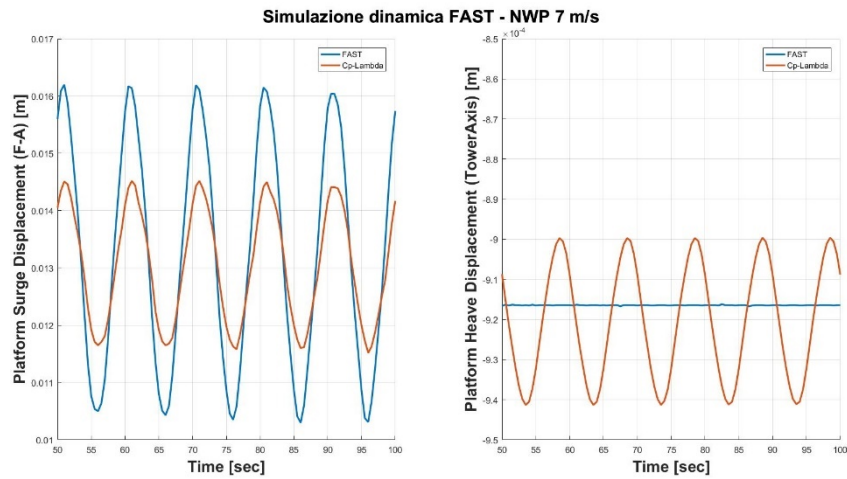
Per quanto riguarda il caso di simulazione reale, in Cp-Lambda non è possibile procedere allo stesso modo in cui sono state verificate le modifiche apportate a FAST. Sul codice della NREL si è infatti intervenuto a livello del codice sorgente imponendo *input* che normalmente verrebbero generati all'interno del programma stesso. In Cp-Lambda invece si è intervenuti sul modello aero-elastico sostituendo il *monopile* con 6 giunti all'interno dei quali sono stati inseriti attuatori e molle. Per questo motivo non è possibile imporre agli attuatori le storie temporali di carico ottenute dalle simulazioni NWP.

Quello che risulta è che la modifica da apportare a Cp-Lambda per permettere una comunicazione con FAST è una questione complessa. L'obiettivo è infatti permettere al sistema di restare in equilibrio sotto la sola azione degli attuatori comandati in forza, liberando quindi i giunti dall'azione delle molle. Da qui si comprende come l'accuratezza del valore dei carichi provenienti dal solutore idro-elastico sia tanto critico quanto la corretta imposizione degli stessi. Questi due aspetti sono stati indagati separatamente, evidenziando la criticità di ciascuno.

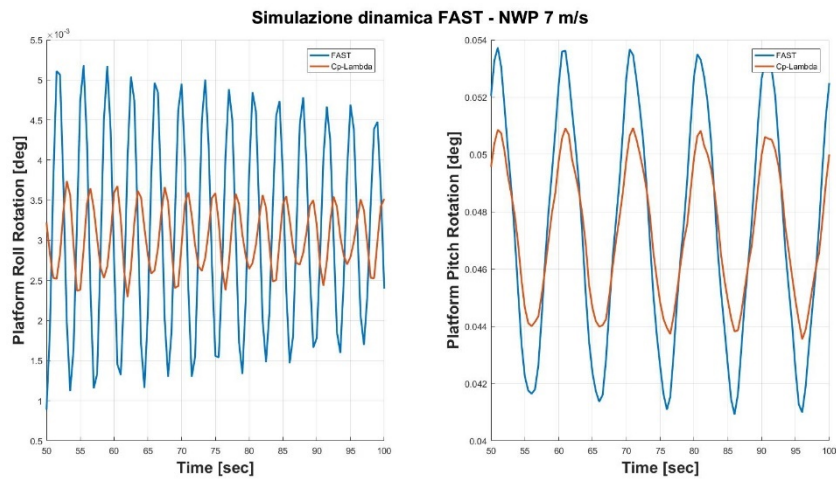
Valutazione dei carichi calcolati dal solutore idro-elastico

È stato svolto un confronto dei risultati forniti dalla versione eseguibile *FAST_red.exe* dando in *input* le storie temporali della cinematica della piattaforma ottenute nelle simulazioni NWP sia con Cp-Lambda che con FAST.

Si è scelto di fornire a *FAST_red.exe* le storie temporali delle simulazioni a regime, ovvero ricavando i dati dagli ultimi 50 secondi delle simulazioni NWP.



*Figura 62 - Spostamento Fore-Aft e verticale della piattaforma:
input per FAST_red.exe*



*Figura 63 - Rotazione a rollio e beccheggio della piattaforma:
input per FAST_red.exe*

La Figura 62 e Figura 63 mostrano come i valori in *input* seppur comparabili presentano delle differenze dovute ai modelli di calcolo differenti tra i due codici. Queste inevitabilmente si ripercuotono sui risultati ottenuti.

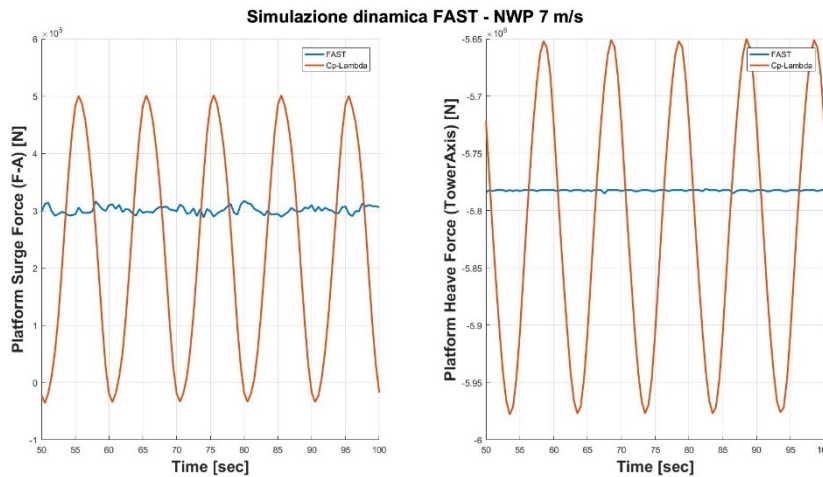


Figura 64 - Forza in direzione Fore-Aft e verticale sulla piattaforma: confronto output

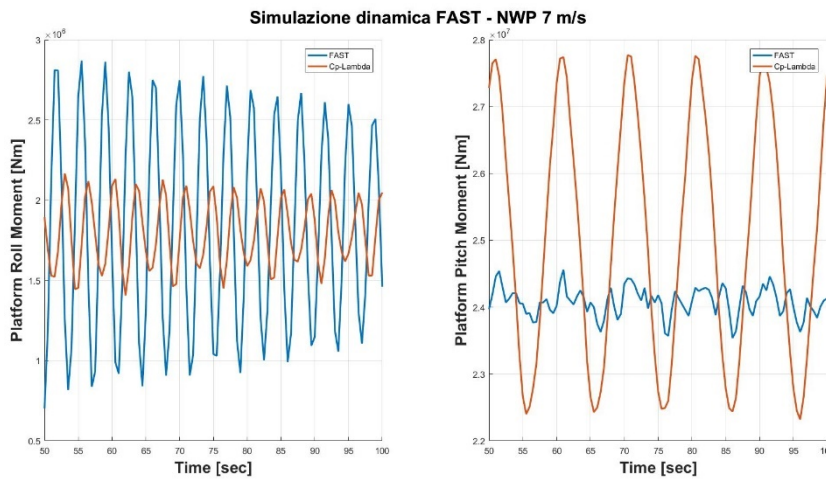


Figura 65 - Momento di rollio e di beccheggio della piattaforma: confronto output

Dal confronto riportato in Figura 64 e in Figura 65 è interessante notare come la dinamica *Side-Side* dei carichi sulla piattaforma (*Sway Force*) riprenda esattamente l'andamento degli spostamenti: poiché in questa direzione non gravano carichi, gli spostamenti in *input* risultano piccoli e la conseguenza è che il solutore idro-elastico valuta coerentemente la dinamica associata.

Al contrario la dinamica *Fore-Aft* (*Surge Force*, *Pitch Moment*) e lungo l'asse torre (*Heave Force*) prevista dal solutore idro-elastico nei due casi è profondamente differente.

Queste discrepanze sono evidenziate in Figura 66 dove vengono rappresentate le differenze percentuali tra i valori medi. Le differenze nelle storie temporali in *input* vengono accentuate dai carichi idrodinamici e dovuti alla gravità che agiscono nelle direzioni considerate.

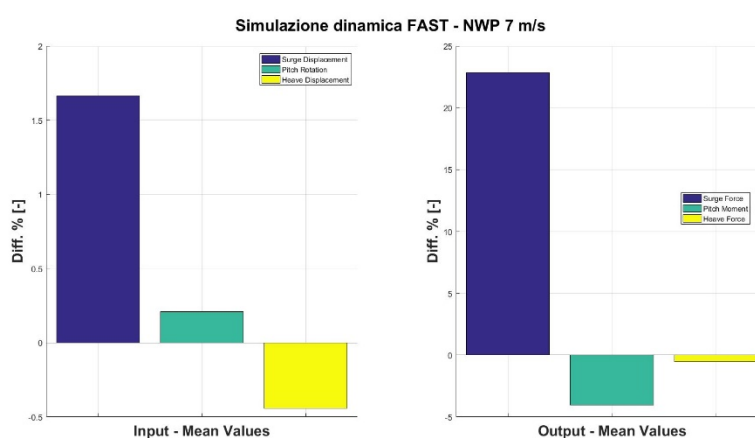


Figura 66 - Differenze percentuali tra valori medi degli input e degli output per FAST_red.exe

Il basso grado di comparazione si nota non solo nella differenza percentuale del valore medio dei carichi in queste direzioni ma soprattutto nelle oscillazioni pronunciate evidenziate in Figura 64 e in Figura 65: il calcolo eseguito dal solutore idro-elastico di FAST con i valori in *input* forniti da Cp-Lambda è tutt'altro che accurato.

La difformità di risultati è da imputarsi, come già trattato nel Paragrafo 4.2.2, alla semplificazione della riduzione di Craig Bampton in SubDyn tramite l'approssimazione statica di Guyan. Il presente metodo utilizzato nel solutore idro-elastico accentua ulteriormente le differenze che già si erano evidenziate nei risultati ottenuti nelle simulazioni NWP.

Applicazione dei carichi tramite gli attuatori

Il secondo aspetto da indagare nel modello Cp-Lambda riguarda l'imposizione dei carichi a base torre. In questo caso si è scelto di operare con la stessa metodologia seguita per la validazione del solutore idro-elastico. L'obiettivo è dunque effettuare una prima simulazione per ricavare i carichi che si generano all'interno della struttura a livello della piattaforma ed utilizzarli in una simulazione successiva per comandare gli attuatori.

In tal senso, è stata effettuata una simulazione dinamica del modello provvisto di giunti all'interno dei quali sono state inserite molle con valori elevatissimi di coefficienti elastici. In questa prima simulazione, gli attuatori presenti anch'essi nei giunti sono stati disconnessi. Modellare molle ad elevati valori di rigidità significa rendere pressoché trascurabile la forza elastica che esse forniscono rispetto alle reazioni interne. Una volta ottenute le storie temporali dei carichi da fornire agli attuatori, si effettua la seconda simulazione in cui essi, resi attivi, sostituiranno le molle nel compito di tenere in equilibrio il sistema. Quello che ci si aspetta è che se l'imposizione dei carichi avviene in modo corretto, la simulazione deve proseguire esattamente come se nei giunti vi fossero ancora modellate le molle.

Ciò che in realtà accade è che le condizioni di equilibrio raggiunte ad ogni time step sono differenti tra i due casi. Il sistema comandato da attuatori pertanto raggiunge una condizione di equilibrio che non è propria della storia temporale dei carichi imposti: ad un certo punto il solutore non riesce più a trovare una condizione di equilibrio ed interrompe il calcolo come mostrato in Figura 67, Figura 68 e Figura 69.

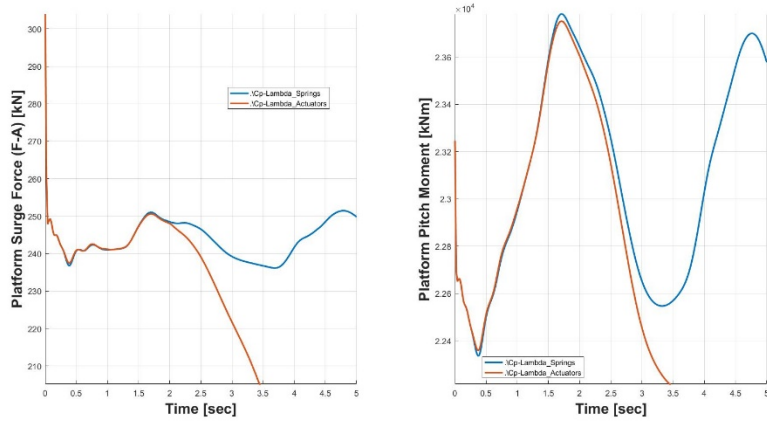


Figura 67 - Confronto Cp-Lambda: dinamica Fore-Aft della piattaforma

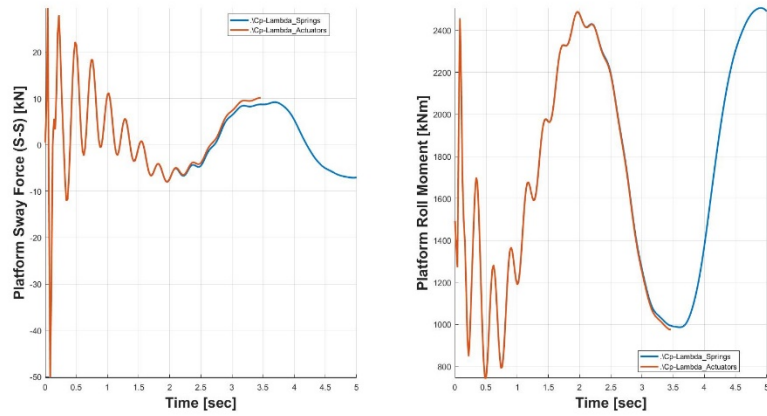


Figura 68 - Confronto Cp-Lambda: dinamica Side-Side della piattaforma

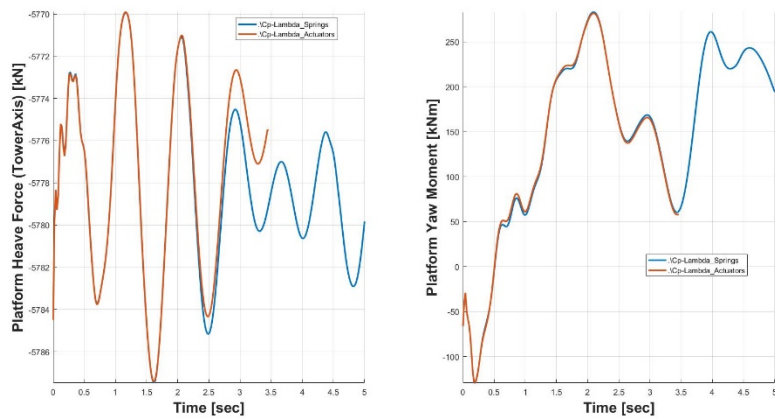


Figura 69 - Confronto Cp-Lambda: dinamica della piattaforma relativa all'asse torre

I risultati riportati mostrano come non basti che il calcolo dei carichi effettuato dal solutore idro-elastico sia coerente con la dinamica prevista da Cp-Lambda. In questo caso infatti le forze necessarie per mantenere il sistema in equilibrio derivano da Cp-Lambda stesso. È necessario inoltre assicurarsi che questi vengano applicati correttamente. Evidentemente il modello Cp-Lambda così pensato ha difficoltà a raggiungere una condizione di equilibrio poiché intrinsecamente labile e ciò richiede un alto livello di accuratezza nell'applicazione delle forze a base torre.

5.3. Considerazioni sui modelli

Come si è potuto notare dalle analisi condotte nel paragrafo precedente, allo stato attuale il modello Cp-Lambda che si è costruito non è in grado di gestire correttamente i carichi provenienti da un eventuale sottosistema idro-elastico. La labilità intrinseca del sistema richiede una notevole accuratezza del valore dei carichi e del posizionamento degli attuatori. Vengono pertanto riportate di seguito alcune considerazioni che scaturiscono da quanto svolto.

Condizioni iniziali

Il codice Cp-Lambda dà la possibilità di impostare come condizione iniziale un qualsiasi istante di una simulazione precedentemente svolta, purché il modello sia congruente. Una condizione di riferimento calcolata opportunamente permette al transitorio di esaurirsi in tempi brevi.

Le condizioni iniziali da cui vengono fatte partire le simulazioni dinamiche vengono trovate grazie a simulazioni "statiche". L'analisi statica permette al sistema di assestarsi ad una condizione di equilibrio raggiunta tramite una simulazione in cui i carichi dovuti alla gravità e all'aerodinamica inizialmente nulli vengono gradualmente aumentati fino ai valori nominali. Ciò è possibile associando al valore della densità dell'aria e della gravità delle *TimeFunctions*, ovvero funzioni definibili a priori che

nell'arco della simulazione regolano il valore di qualsivoglia grandezza presente all'interno del codice.

Durante una simulazione statica le velocità e accelerazioni di qualsiasi punto del modello sono nulle. Come è stato verificato nel paragrafo precedente, fornire a FAST valori di posizioni, velocità e accelerazioni non congruenti porta il solutore idro-elastico a restituire valori di carichi non coerenti con la dinamica che prevede Cp-Lambda. Pertanto la condizione iniziale per Cp-Lambda per effettuare il calcolo aero-servo-idro-elastico attraverso il modello accoppiato sembrerebbe necessaria da trovare tramite una simulazione statica in cui il richiamo di *FAST_DLL.dll* venga escluso. Di conseguenza il modello del quale si sta trovando la configurazione di equilibrio risulta essere di fatto un modello in cui gli attuatori sono disattivati e in cui l'equilibrio è garantito dalle molle inserite nei giunti.

In questo modo l'analisi dinamica dovrà tener conto che configurazione di riferimento da cui parte vede la presenza di molle sufficientemente rigide da tenere il sistema in equilibrio e conseguentemente vincolando il sistema.

Da questa considerazione si comprende come anche la fase di avvio della co-simulazione dove le molle dovranno essere sostituite dagli attuatori risulta essere un aspetto critico e da approfondire.

Approccio alternativo nella strategia di accoppiamento

Oltre a quanto appena descritto è possibile fare una ulteriore considerazione. Come è stato spiegato nel paragrafo 5.2.1, la modalità *glue-code* di FAST risolve le relazioni *input-output* tra accelerazioni e carichi a livello della piattaforma e della struttura di supporto tramite una matrice Jacobiano. Questo permette la risoluzione del problema implicito relativo all'accoppiamento tra i sottosistemi aero-servo-elastico e idro-elastico.

Alla luce di quanto appena detto, si potrebbe pensare di risolvere il problema implicito direttamente in Cp-Lambda, ovvero facendo interrogare il solutore idro-elastico

al codice di simulazione piuttosto che a PoliWindController. Come in Cp-Lambda è presente l'interfaccia per il sistema di controllo, allo stesso modo si potrebbe implementare una funzione di richiamo alla libreria dinamica di FAST.

Per come è stato pensato l'accoppiamento tra i due sottosistemi in questo elaborato, bisogna tener presente che la co-simulazione si svolge con un singolo richiamo al solutore idro-elastico per passo di integrazione. Sebbene entrambi i solutori possano essere a convergenza, non è assolutamente detto che lo sia il sistema accoppiato. In questo modo dunque sarebbe possibile effettuare per ogni passo di integrazione un ciclo all'interno del solutore di Cp-Lambda in cui la libreria dinamica viene chiamata n volte aggiornando di volta in volta gli input che necessitano i due sottosistemi.

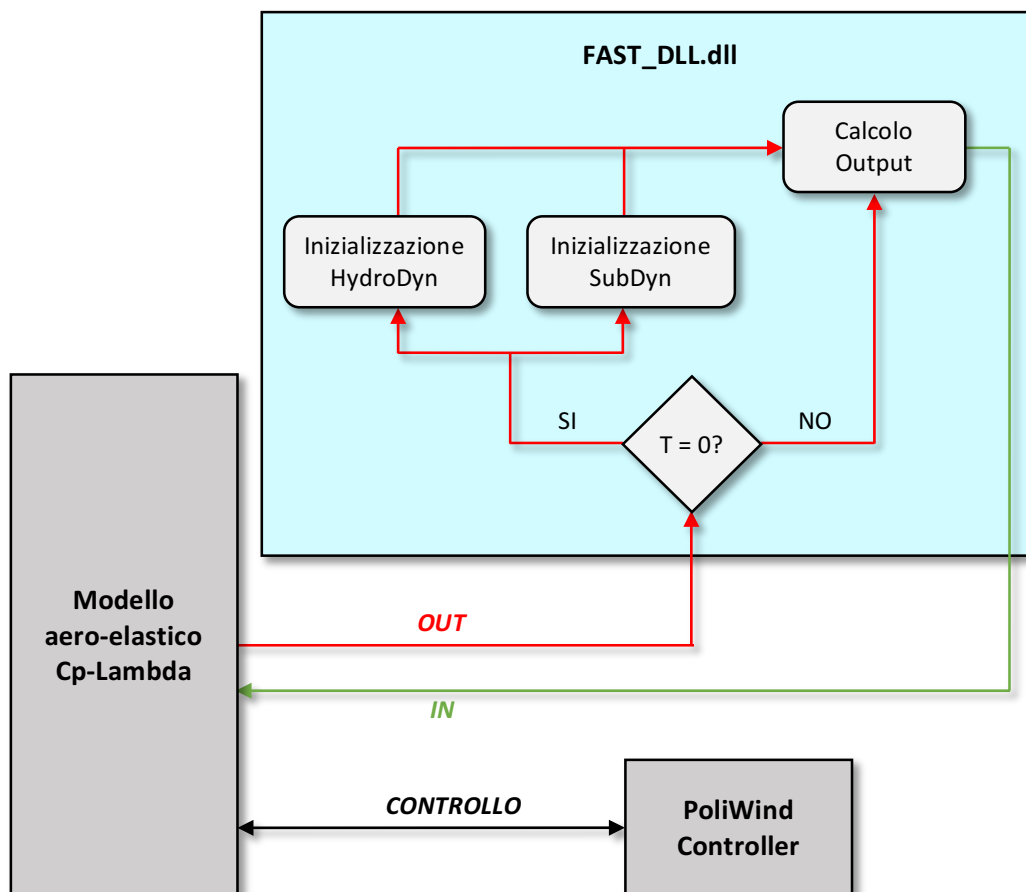


Figura 70 - Schema funzionale della co-simulazione Cp-Lambda - FAST.
Richiamo FAST_DLL.dll da Cp-Lambda

Il programma che si è pensato dunque può essere rappresentato dallo schema di Figura 70, dove le due librerie dinamiche associate al controllo e al solutore idro-elastico vengono separate e richiamate con differenti logiche:

- *FAST_DLL.dll* viene chiamata più volte all'interno del singolo passo temporale per garantire la convergenza del sistema accoppiato;
- *PoliWindController* viene chiamato ad intervalli di tempo definiti dal *communication interval* per effettuare il controllo della macchina.

CAPITOLO 6

CONCLUSIONI

E SVILUPPI FUTURI

Il presente lavoro di tesi si è posto l'obiettivo di realizzare un codice in grado di effettuare una analisi aero-servo-idro-elastica di un aerogeneratore multi-megawatt. Durante il lavoro sono stati raggiunti obiettivi intermedi che possono dare un valido supporto al raggiungimento di questa finalità.

Innanzitutto è stato affinato il modello C_p -Lambda della macchina *NREL 5MW*. I risultati ottenuti in termini di frequenze proprie mostrano infatti differenze percentuali inferiori al 2%. Inoltre, le analisi prestazionali effettuate tramite le curve C_p - λ hanno evidenziato due aspetti:

- la modellazione aerodinamica dei due codici è congruente. I due punti di funzionamento ottimo nel diagramma C_p -TSR ottenuti con i due codici nel caso di vento assiale di 1 m/s sono prossimi attestando all'1% la differenza tra i valori del C_p massimo e del TSR ottimo.
- il caso con vento orizzontale di 11.4 m/s fa emergere le differenze nella modellazione strutturale implementata nei codici. Ad elevati valori di passo i C_p ottenuti mostrano discrepanze. La spiegazione risiede nel fatto che il calcolo a base modale di ElastoDyn in FAST porta a trascurare l'effetto della torsione della pala che invece è tenuto in conto da Cp-Lambda. Infatti, le curve effettuate successivamente con Cp-Lambda irrigidendo la pala a torsione confermano quanto supposto.

In seguito è stato impostato il sistema di controllo PoliWindController. È stato valutato che può essere utilizzato anche nelle simulazioni con il codice FAST. Questo aspetto è una prerogativa per poter effettuare una comparazione delle simulazioni con i due codici.

Sono state effettuate simulazioni dinamiche in ambiente *offshore* per permettere una validazione dello schema di controllo. È stato necessario generare una storia di onde equivalente per i due codici servendosi della versione *stand-alone* di HydroDyn per assicurarsi che i modelli fossero soggetti alle stesse condizioni di carico.

Attraverso le simulazioni NWP è stato dimostrato come lo schema LQR con Integral State sia notevolmente accurato nell'inseguimento della corretta velocità di rotazione del rotore. Il sistema di controllo è risultato infatti funzionare in modo soddisfacente garantendo una differenza percentuale inferiore dell'1% delle potenze medie erogate dai due modelli alle diverse velocità di vento. Emergono tuttavia differenze nel passo pala imposto dal controllore, tanto più rilevanti quanto la velocità del vento è elevata. Questo è una conseguenza della differente modellazione strutturale già emersa durante l'analisi delle curve $C_p-\lambda$.

È stato approfondito il confronto delle risposte dinamiche dei due modelli valutate nelle simulazioni NWP. Si sottolinea un buon grado di comparazione nonostante le differenti modellazioni strutturali che riguardano, oltre ElastoDyn, anche il solutore idro-elastico di FAST. La riduzione statica tramite l'approssimazione di Guyan in Sub-Dyn potrebbe essere la causa di tali discordanze.

È stata condotta una analisi per verificare la completa compatibilità di PoliWindController con FAST. A tal fine si è effettuata una DLC 1.5 che prevede la perdita improvvisa del controllo a seguito di una raffica. I risultati mostrano come la funzione di Supervisione del sistema di controllo sia perfettamente funzionante sia con $C_p-\lambda$ che con FAST.

L'ultima parte del lavoro di tesi ha riguardato lo studio di una possibile soluzione per l'accoppiamento tra Cp-Lambda e FAST. L'obiettivo era di effettuare una co-simulazione del modello con struttura di supporto *monopile*.

Come primo aspetto è stato esaminato il codice della NREL. L'analisi di FAST ha portato a concludere che grazie alla architettura modulare che lo contraddistingue è possibile isolare blocchi di programma previo opportune modifiche al codice. Nel caso in questione si è isolato il blocco relativo al calcolo idro-elastico composto dai moduli HydroDyn e SubDyn. Dallo studio effettuato è emerso come l'interazione tra i sottosistemi idro-elastico e aero-servo-elastico avvenga attraverso la dinamica della piattaforma, la quale è modellata in ElastoDyn. Per permettere una completa indipendenza del solutore idro-elastico dal resto del codice è stato necessario apportare alcune modifiche per far sì che il modulo ElastoDyn venisse escluso da qualsiasi richiamo del *driver*. Le prove effettuate sul codice modificato hanno dimostrato come la strategia di azione si è rivelata corretta. A questo punto è stato possibile renderlo una libreria dinamica in grado di comunicare con una unità chiamante, quale il Poli-WindController, attraverso lo *swap-array*.

Infine si è cercato di rendere il modello Cp-Lambda compatibile con il solutore idro-elastico appena descritto. L'idea è stata di sostituire il pilone di supporto con 6 giunti collegati in serie alla piattaforma per garantire i 6 gradi di libertà della stessa. Sono stati posizionati sensori nei giunti e sul corpo rigido che modella la piattaforma per poter ricavare la cinematica necessaria al solutore idro-elastico. Sono stati modellati attuatori all'interno dei giunti per permettere il trasferimento di carichi al sottosistema aero-servo-elastico. Per poter gestire l'avvio della simulazione inoltre sono state inserite molle le cui rigidità vengono gradualmente rese nulle adibendo ai soli attuatori il compito di tenere il sistema in equilibrio. Le prove effettuate sul modello Cp-Lambda così modificato evidenziano la criticità del corretto posizionamento e comando degli attuatori nel momento in cui l'azione delle molle viene a mancare.

In estrema sintesi, è stata dunque fornita la libreria dinamica atta al calcolo idro-elastico proveniente dal codice FAST. Per renderla completamente compatibile con Cp-Lambda sarà necessario riuscire ad implementare correttamente la dinamica della piattaforma attraverso i soli attuatori e soprattutto indagare una possibile strategia per l'avvio della co-simulazione.

In alternativa, potrebbe essere risolutivo implementare una funzione in Cp-Lambda che permetta il richiamo del solutore idro-elastico. Questo potrebbe avere risvolti positivi nella simulazione, permettendo la corretta convergenza del modello accoppiato.

Eventuali sviluppi futuri dunque possono essere:

- perfezionamento del calcolo effettuato da SubDyn affinando la taratura del metodo Craig-Bampton;
- ottimizzazione del modello Cp-Lambda cercando di risolvere la criticità emersa nel comando degli attuatori;
- ricerca di una strategia per l'avvio della co-simulazione trovando una condizione iniziale che possa rappresentare anche quanto provenga dal solutore idro-elastico;
- ricerca di una diversa strategia di interfaccia tra Cp-Lambda e FAST: accoppiamento senza la presenza di un *linker* e ciclo interno al solutore di Cp-Lambda per favorire la convergenza del calcolo del modello completo;
- analisi comparativa del modello aero-servo-idro-elastico tramite i tre codici: Cp-Lambda, FAST, codice accoppiato;
- analisi di un modello aero-servo-idro-elastico con diverse tipologie di strutture di supporto effettuata con il codice accoppiato ed eventuale validazione dei risultati ottenuti in vasca navale.

Bibliografia

- [1] J. Jonkman e W. Musial, «Offshore Code Comparison Collaboration (OC3) for IEA Task 23 Offshore Wind Technology and Deployment,» NREL, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, 2010.
- [2] A. Croce, «Cp-Lambda Introduction,» Politecnico di Milano, Milano, 2012.
- [3] J. Jonkman e M. Buhl, «FAST User's Guide,» NREL, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, 2005.
- [4] B. Jonkman e J. Jonkman, «ReadMe File for FAST v8.16.00a-bjj,» 2016.
- [5] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial e G. Scott, «Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development,» NREL, 1617 Cole Boulevard, Golden, Colorado 80401-3393, 2009.
- [6] H. Kooijman, C. Lindenburg, D. Winkelaar e E. van der Hooft, «Aero-elastic modelling of the DOWEC 6 MWpre-design in PHATAS,» DOWEC Dutch Offshore Wind Energy Converter 1997–2003 Public Reports, Petten, the Netherlands, 2003.
- [7] I. Quarta, «Sviluppo di tecnologie per l'analisi aero-servo-idro-elastica di un aerogeneratore da 5MW,» Politecnico di Milano, Milano, 2015.
- [8] J. Jonkman, A. Robertson e G. Hayman, «HydroDyn User's Guide and Theory Manual,» NREL.
- [9] Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, «Cp-Lambda Manual ver.5.2,» Politecnico di Milano, Milano, 2010.
- [10] A. Croce, «PoliWindController for Cp-Lambda aeroelastic code,» Politecnico di Milano, Milano, 2010.
- [11] E. Bossanyi, «GH Bladed Version 3.51 User Manual,» Garrad Hassan and Partners Ltd., 2003.
- [12] B. Jonkman e L. Kilcher, «TurbSim User's Guide: Version 1.06.00,» NREL, 2012.
- [13] WindEurope, «Wind in Power - 2016 European Statistics,» WindEurope, 2017.
- [14] A. Wright e L. Fingersh, «Advanced Control Design for Wind Turbines,» NREL, 2008.
- [15] D. Laino e C. Hansen, «AeroDyn User's Guide,» NREL, 2002.

-
- [16] B. Jonkman, J. Jonkman, J. Michalakes e M. Buhl, «NWTC Programmer's Handbook: A Guide for Software Development Within the FAST Computer-Aided Engineering Tool,» NREL, 2012.
- [17] J. Jonkman, «Overivew of FAST - NREL Wind Turbine Modeling,» NREL, 2014.
- [18] J. Jonkman, «Overview of the ElastoDyn Structural-Dynamics Module - NREL Wind Turbine Modeling Workshop,» NREL, 2013.
- [19] A. Cordle e J. Jonkman, «State of the Art in Floating Wind Turbine Design Tools,» NREL, 2011.
- [20] R. Damiani, J. Jonkman e G. Hayman, «SubDyn User's Guide and Theory Manual,» NREL.
- [21] J. Jonkman, «The New Modularization Framework for the FAST Wind Turbine CAE Tool,» NREL, 2013.
- [22] G. Bir, «User's Guide to BModes (Software for Computing Rotating Beam Coupled Modes),» NREL, 2005.
- [23] M. Buhl, «WTPerf User's Guide,» NREL, 2004.
- [24] C. Bottasso, A. Croce, Y. Nam e C. Riboldi, «Power curve tracking in the presence of a tip speed constraint,» Politecnico di Milano, Milano, 2011.

APPENDICE A

Modello 5 MW

Cp-Lambda

Viene riportato di seguito in maniera dettagliata come è stato costruito il modello per il codice Cp-Lambda a partire dai dati esposti in Capitolo 3.

A.1. Proprietà generali macchina

Si riporta Tabella 5 di Paragrafo 3.1.1.

Tabella 19 - Proprietà generali NREL 5-MW Baseline Wind Turbine

Rating	5 MW
Rotor Orientation, Configuration	Upwind, 3 Blades
Control	Variable Speed, Collective Pitch
Drivetrain	High Speed, Multiple-Stage Gearbox
Rotor, Hub Diameter	126 m, 3 m
Effective Rotor Diameter (with Precone effect)	125.88 m
Hub Height	90 m
Cut-In, Rated, Cut-Out Wind Speed	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-In, Rated Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm
Rated Tip Speed	80 m/s
Overhang, Shaft Tilt, Precone	5 m, 5°, 2.5°
Rotor Mass	110'000 kg
Nacelle Mass	240'000 kg
Tower Mass	347'460 kg
Coordinate Location of Overall CM	(-0.2 m, 0.0 m, 64.0 m)

A.2. Pala

Si riporta Tabella 6 di Paragrafo 3.1.2.

Tabella 20 - Proprietà generali pala

Length (w.r.t. Root Along Preconed Axis)	61.5 m
Mass Scaling Factor	4.536%
Overall (Integrated) Mass	17'740 kg
Second Mass Moment of Inertia (w.r.t. Root)	11'776'047 kg•m ²
First Mass Moment of Inertia (w.r.t. Root)	363'231 kg•m
CM Location (w.r.t. Root along Preconed Axis)	20.475 m
Structural-Damping Ratio (All Modes)	0.477465%

Proprietà strutturali

La Table 2-1 di [5] riporta le proprietà strutturali distribuite lungo la lunghezza della pala. Tra le proprietà elencate figurano:

- Radius [m]: raggio dal centro del rotore della sezione considerata.
- BLFract [-]: posizione relativa in apertura della sezione considerata, a partire da radice (0.0) fino ad estremità (1.0).
- AeroCent [-]: questo valore adimensionalizzato in corda è necessario per FAST per localizzare la posizione del centro aerodinamico. Si tenga presente che AeroCent *non* rappresenta la posizione *reale* del centro aerodinamico della sezione. FAST modella le sezioni di pala assumendo per ciascuna di esse un pitch axis *fittizio* al 25% di corda, indipendentemente dalla reale geometria. Pertanto AeroCent rappresenta la posizione *fittizia* del centro aerodinamico tale da garantire una distanza dal pitch axis *fittizio* pari alla stessa distanza tra le posizioni *reali* del centro aerodinamico e del pitch axis. L'equazione che regola quindi il valore di AeroCent è la seguente:

$$[\text{AeroCent} - 0.25] =$$

$$[(\text{posizione } \textit{reale} \text{ centro aerodinamico}) - (\text{posizione } \textit{reale} \text{ pitch axis})]$$

Dove lo 0.25 in equazione è la posizione *fittizia* del pitch axis, fisso per ciascuna sezione. Se la quantità [AeroCent - 0.25] è negativa, allora il centro aerodinamico è posto tra bordo d'attacco e pitch axis. Se invece la quantità [AeroCent - 0.25] è nulla, centro aerodinamico e pitch axis coincidono.

Un esempio numerico del calcolo di AeroCent è il seguente:

- in radice (e.g., BIFract = 0.0), essendo la forma della sezione cilindrica, il centro aerodinamico e il pitch axis *reali* coincidono al 50% di corda. Sostituendo nell'equazione precedente si ha:

$$\text{AeroCent} = 0.25 + [(0.5) - (0.5)] = 0.25$$

- in estremità (e.g., BIFract = 1.0), il centro aerodinamico *reale* è posto al 25% e il pitch axis *reale* è posto al 37.5%. In questo caso dunque:

$$\text{AeroCent} = 0.25 + [(0.25) - (0.375)] = 0.125$$

Le posizioni *reali* di pitch axis e centro aerodinamico per il modello di pala in esame non sono presenti in [5] tuttavia il suo autore, Jason Jonkman, ha pubblicato successivamente questi valori dichiarando che:

$$\text{posizione reale pitch axis} = \text{AeroCent} + 0.25$$

e di conseguenza sfruttando l'equazione di AeroCent

$$\text{posizione reale centro aerodinamico} = 2 \cdot \text{AeroCent}$$

A partire dalla versione v8.03.02 di FAST, il *BldFile* di ElastoDyn contenente le proprietà strutturali della pala non fa più riferimento ad AeroCent, bensì a PitchAxis. Questo ancora una volta *non* è da intendersi come la posizione *reale* del pitch axis, ma come la posizione *fittizia* in riferimento ad un centro aerodinamico *fittizio* posto per ciascuna sezione al 25%. In virtù di quanto appena descritto per AeroCent, l'equazione per trovare questo valore di PitchAxis è la seguente:

$$[\text{PitchAxis} - 0.25] =$$

$$[(\text{posizione reale pitch axis}) - (\text{posizione reale centro aerodinamico})]$$

Oppure, sostituendo all'interno di questa equazione la definizione di AeroCent:

$$\text{PitchAxis} = 0.5 - \text{AeroCent}$$

- StrcTwst [°]: svergolamento strutturale, definito come l'orientazione degli assi elastici. Viene fatto coincidere con lo svergolamento aerodinamico, ovvero come quell'angolo che indica l'orientazione della corda. Quest'ultimo è preso dall'Appendix A di [2], sottratto di una quantità pari a 0.09182° per assicurare che anche la pala di 61.5-m abbia uno svergolamento nullo in estremità.
- BMassDen [kg/m]: Massa per unità di lunghezza. In Table 2-1 di [5] sono presenti i valori di Appendix A di [6]. Per ottenere una pala di massa pari a quella della macchina REpower 5M è necessario aumentare questi valori del 4.536%.
- FlpStff [Nm²], EdgStff [Nm²], FlpIner [kgm], EdgIner [kgm]: rigidzze e inerzie a flappeggio e a ritardo. Queste sono date rispetto agli assi principali di ciascuna sezione, tenendo ovvero conto del rispettivo angolo di svergolamento, "StrcTwst".
- GJStff [Nm²]: rigidzza torsionale della pala.
- EASTff [Nm²]: rigidzza assiale della pala. Questa non è presente in [6] e pertanto è stimata essere 10^7 volte la media delle inerzie di ciascuna sezione. (si veda [5]).
- FlpcgOf [m]: offset in metri tra il pitch axis e il centro di massa della sezione in direzione perpendicolare alla corda. Posta nulla.
- EdgcgOf [m]: offset in metri lungo la corda tra il pitch axis e il centro di massa della sezione, positivo in direzione del bordo di uscita.
- FlpEAOOf [m], EdgEAOOf [m]: offset in metri tra il pitch axis e le coordinate dell'asse elastico. Poste nulle.

Le proprietà strutturali definite sezione per sezione per Cp-Lambda vengono prese direttamente dalla tabella appena descritta. In particolare:

- EtaValue: BlFract;

-
- AxialStiffness: EAS_{stff};
 - BendingStiffness: Flp_{stff}, Edg_{stff}, 0.0;
 - TorsionalStiffness: GJ_{stff};
 - ShearingStff: Flp_{stff}*10, Edg_{stff}*10, 0.0;

(Questa è mancante nelle proprietà di Table 2-1 di [5] e pertanto si sono presi i valori di BendingStiffness aumentati di un fattore 10.)

- MassPerUnitSpan: BMassDen;
- MomentsOfInertia: Flplner+Edglner, Flplner, Edglner;
- CenterOfMass: -Edg_{cgOf}, 0.0;

(È necessario cambiare il segno poiché per Cp-Lambda il sistema di riferimento della sezione è centrato nel pitch axis e l'asse allineato con la corda è orientato verso il bordo di attacco.)

- ShearCenter: 0.0, 0.0;
- Centroid: 0.0, 0.0;

(Lo ShearCenter è il punto di riferimento per la rigidezza torsionale e le rigidezze a taglio mentre il Centroid è il punto di riferimento per le ridigeezze assiali e flessionali. Per come sono definiti i valori delle rigidezze in Table 2-1 di [5], in Cp-Lambda questi punti vengono posti coincidenti con il pitch axis.)

- DampingCoefficient: 0.005;

Proprietà aerodinamiche

La descrizione aerodinamica della pala è esposta in Table 3-1 di [5]. Tra le proprietà elencate figurano:

- RNodes [m]: posizione del nodo aerodinamico lungo il Pitch Axis. (Si tenga presente che, per come sono stati definiti gli RNodes, i valori riportati per l'ultimo

pannello non fanno riferimento all'estremità della pala. Per ottenere i valori in estremità è necessario infatti interpolare linearmente tra le stazioni 61.2-m e 61.7-m presenti in Appendix A di [6].)

- AeroTwst [°]: svergolamento aerodinamico in riferimento al nodo aerodinamico. Questi valori vengono presi per definire anche lo svergolamento strutturale. Lo svergolamento aerodinamico è preso dall'Appendix A di [6], sottratto di una quantità pari a 0.09182° per assicurare che anche la pala di 61.5-m abbia uno svergolamento nullo in estremità.
- DRNodes [m]: lunghezza del pannello a cui fa riferimento il nodo aerodinamico
- Chord [m]: lunghezza della corda in riferimento al nodo aerodinamico.
- Airfoil Table [-]: nome del profilo aerodinamico nel pannello considerato.

Per riportare in Cp-Lambda quanto appena descritto è necessario tenere presente che a ciascun pannello è associato uno degli otto profili, con il risultato di una distribuzione di profili costante a tratti. Si sottolinea quindi che le discontinuità non si trovano a cavallo degli RNodes, ovvero i nodi aerodinamici, ma tra un pannello e l'altro.

A.3. Hub e navicella

Si riporta Tabella 7 di Paragrafo 3.1.3.

Tabella 21 - Proprietà hub e navicella

Elevation of Yaw Bearing above Ground	87.6 m
Vertical Distance along Yaw Axis from Yaw Bearing to Shaft	1.96256 m
Distance along Shaft from Hub Center to Yaw Axis	5.01910 m
Distance along Shaft from Hub Center to Main Bearing	1.912 m
Hub Mass	56'780 kg
Hub Inertia about Low-Speed Shaft	115'926 kg•m ²
Nacelle Mass	240'000 kg
Nacelle Inertia about Yaw Axis	2'607'890 kg•m ²
Nacelle CM Location Downwind of Yaw Axis	1.9 m
Nacelle CM Location above Yaw Bearing	1.75 m
Equivalent Nacelle-Yaw-Actuator Linear-Spring Constant	9'028'320'000 N•m/rad
Equivalent Nacelle-Yaw-Actuator Linear-Damping Constant	19'160'000 N•m/(rad/s)

Nominal Nacelle-Yaw Rate	0.3°/s
--------------------------	--------

La massa della navicella comprende anche la massa del generatore.

A.4. Generatore e albero motore

Si riporta Tabella 8 di Paragrafo 3.1.4.

Tabella 22 - Proprietà generatore e albero motore

Rated Rotor Speed	12.1 rpm
Rated Generator Speed	1173.7 rpm
Gearbox Ratio	97:1
Electrical Generator Efficiency	94.4%
Generator Inertia about High-Speed Shaft	534.116 kg•m ²
Equivalent Drive-Shaft Torsional-Spring Constant	867'637'000 N•m/rad
Equivalent Drive-Shaft Torsional-Damping Constant	6'215'000 N•m/(rad/s)
Fully-Deployed High-Speed Shaft Brake Torque	28'116.2 N•m
High-Speed Shaft Brake Time Constant	0.6 s

Lo schema topologico di Cp-Lambda non include la modellazione di un gear box. Per tale motivo è necessario riportare le inerzie del generatore sull'albero lento:

$$\text{Gen. Inertia about LSS} = \text{Gen. Inertia about HSS} \cdot \text{GBR}^2$$

$$= 5'025'497.444 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

Inoltre, per tenere conto della flessibilità dell'albero è stato inserito un giunto di rivoluzione tra il generatore e la trave che modella l'albero. Per modellarne la cedevolezza, sono stati associati al giunto una molla torsionale e smorzatore di caratteristiche riportate in Tabella 22.

A.5. Struttura di supporto

Torre per applicazione onshore

Si riporta Tabella 9 di Paragrafo 3.1.5.

Tabella 23 - Proprietà torre per applicazione land-based

Height above Ground	87.6 m
Overall (Integrated) Mass	347'460 kg
CM Location (w.r.t. Ground along Tower Centerline)	38.234 m
Structural-Damping Ratio (All Modes)	1%

Le proprietà distribuite della torre sono presentate in Table 6-1 di [5]. Tra esse figurano:

- Elevation [m]: altezza rispetto al suolo della sezione considerata.
- HtFract [-]: posizione relativa in apertura della sezione considerata, a partire da base (0.0) fino ad estremità (1.0).
- TMassDen [kg/m]: massa per unità di lunghezza.
- TwFASTff [Nm²], TwSSStff [Nm²], TwFAlner [kgm], TwSSIner [kgm]: rigidzze e inerzie Fore-Aft e Side-Side della torre.
- TwGJStff [Nm²]: rigidzza torsionale della torre.
- EASTff [Nm²]: rigidzza assiale della torre.
- TwFAcgOf [m], TwSScgOf [m]: offset in metri tra l'asse della torre e le coordinate il centro di massa della sezione. Poste nulle in quanto torre tubolare.

Le proprietà strutturali definite sezione per sezione per Cp-Lambda vengono prese direttamente da questa tabella. In particolare:

- EtaValue: Si è fatta la scelta di utilizzare una trave per ciascun elemento di torre, pertanto questo valore non coincide con HtFract.
- AxialStiffness: TwEASTff;
- BendingStiffness: TwFASTff, TwSSStff, 0.0;
- TorsionalStiffness: TwGJStff;
- ShearingStff: TwFASTff*10, TwSSStff *10, 0.0;

(Questa è mancante nelle proprietà di Table 6-1 di [5] e pertanto si sono presi i valori di BendingStiffness aumentati di un fattore 10.)

- MassPerUnitSpan: TMassDen;
- MomentsOfInertia: TwFAlner + TwSSIner, TwFAlner, TwSSIner;
- CenterOfMass: 0.0, 0.0;
- ShearCenter: 0.0, 0.0;
- Centroid: 0.0, 0.0;
- DampingCoefficient: 0.005;

Struttura di supporto per applicazione offshore:

Si riporta Tabella 10 di Paragrafo 3.1.5.

Tabella 24 - Proprietà struttura di supporto per applicazione offshore

Tower-Top Height Above MSL	87.6 m
Tower-Base Height Above MSL	10 m
Water Depth (From MSL)	20 m
Overall (Integrated) Mass	522'617 kg
c.g. Location (w.r.t. Mudline Along Tower Centerline)	37.172 m
Structural-Damping Ratio (All Modes)	1%

Le proprietà distribuite della torre sono presentate in Table 2 di [1]. Tra esse figurano:

- Elevation [m]: altezza rispetto al MSL della sezione considerata.
- HtFract [-]: posizione relativa in apertura della sezione considerata, a partire dal fondo del mare (0.0) fino ad estremità (1.0).
- TMassDen [kg/m]: massa per unità di lunghezza.
- TwFASTff [Nm²], TwSSStff [Nm²], TwFAlner [kgm], TwSSIner [kgm]: rigidzze e inerzie Fore-Aft e Side-Side della torre.
- TwGJStff [Nm²]: rigidzza torsionale della torre.

-
- EAS_{tff} [Nm^2]: rigidezza assiale della torre.
 - $TwFA_{cgOf}$ [m], $TwSS_{cgOf}$ [m]: offset in metri tra l'asse della torre e le coordinate il centro di massa della sezione. Poste nulle in quanto torre tubolare.

Le proprietà strutturali definite sezione per sezione per Cp-Lambda vengono prese direttamente da questa tabella. In particolare:

- $EtaValue$: Si è fatta la scelta di utilizzare una trave per ciascun elemento di torre, pertanto questo valore non coincide con $HtFract$.
- $AxialStiffness$: $TwEAS_{tff}$;
- $BendingStiffness$: $TwFA_{stff}$, $TwSS_{stff}$, 0.0;
- $TorsionalStiffness$: $TwGJ_{stff}$;
- $ShearingStiff$: $TwFA_{stff} * 10$, $TwSS_{stff} * 10$, 0.0;

(Questa è mancante nelle proprietà di Table 6-1 di [5] e pertanto si sono presi i valori di $BendingStiffness$ aumentati di un fattore 10.)

- $MassPerUnitSpan$: $TMassDen$;
- $MomentsOfInertia$: $TwFA_{Iner} + TwSS_{Iner}$, $TwFA_{Iner}$, $TwSS_{Iner}$;
- $CenterOfMass$: 0.0, 0.0;
- $ShearCenter$: 0.0, 0.0;
- $Centroid$: 0.0, 0.0;
- $DampingCoefficient$: 0.005;

APPENDICE B

Validazione modello

NREL 5MW

Viene riportato di seguito il confronto tra i modelli sviluppati per i due codici. Si analizza il procedimento con cui sono state ricavate le frequenze proprie, il diagramma di Campbell e le curve C_p - λ . Infine vengono riportate le storie temporali ottenute nelle simulazioni NWP dei sensori presi in esame nel Capitolo 4.

B.1. Frequenze proprie

Per il calcolo delle frequenze proprie di pala e di torre per il modello FAST si è utilizzato il software *BModes*, sviluppato anch'esso dalla NREL. Questo codice è in grado di calcolare gli autovalori e le deformate di una trave incastrata con l'eventuale presenza di una massa in estremità. Inoltre NREL distribuisce anche uno strumento in formato Excel che permette di ricavare i coefficienti polinomiali necessari al codice FAST per la descrizione modale del modello di pala e di torre a partire dai risultati ottenuti con *BModes*.

Il codice Cp-Lambda invece permette direttamente il calcolo degli autovalori di parti singole della struttura.

Nelle tabelle successive sono presentati i confronti sugli autovalori della pala isolata e della torre. Di quest'ultima sono stati effettuati i confronti sia con estremo libero che con *tip mass*.

Pala isolata

Tabella 25 - Frequenze pala isolata [Hz]

MODO	FAST (BModes)	Cp-Lambda	Diff %
I Flap-Wise	0.6764	0.6732	0.474%
I Edge-Wise	1.0897	1.0847	0.464%
II Flap-Wise	1.9488	1.9557	-0.353%
II Edge-Wise	4.0431	4.0045	0.965%

Torre – modello *onshore*

Per le frequenze di torre il confronto è riportato sul modello *onshore*. Per il caso con *tip mass*, la massa puntuale in estremità è stata posta pari a 350'000 kg. Questo valore corrisponde alla massa del gruppo rotore-navicella, ricavato a partire dai dati presenti in Tabella 5. Sia *BModes* che *Cp-Lambda* permettono inoltre di dare una posizione al centro di massa della *tip mass*. Per il caso in questione, le coordinate nel riferimento del punto di estremità torre sono le seguenti:

- Offset lungo asse torre: +1.97 m
- Offset in direzione upwind: +0.4137 m

Tabella 26 - Frequenze torre senza *tip mass* [Hz]

MODO	FAST (BModes)	Cp-Lambda	Diff %
I Side-Side	0.89105	0.88785	0.360%
I Fore-Aft	0.89105	0.88785	0.360%
II Side-Side	4.37452	4.34743	0.623%
II Fore-Aft	4.37452	4.34743	0.623%
III Side-Side	11.39220	11.23139	1.432%
III Fore-Aft	11.39220	11.23139	1.432%
I Torsional	11.96170	11.95911	0.022%

Tabella 27 - Frequenze torre con tip mass [Hz]

MODO	FAST (BModes)	Cp-Lambda	Diff %
I Side-Side	0.31876	0.31353	-1.669%
I Fore-Aft	0.32179	0.31652	-1.665%
II Side-Side	1.47862	1.48052	0.128%
II Fore-Aft	1.88104	1.89355	0.660%
III Side-Side	2.24135	2.26567	1.073%
III Fore-Aft	4.73431	4.73201	-0.049%
I Torsional	5.19806	5.23718	0.747%

B.2. Diagramma di Campbell

Il codice FAST permette di effettuare una analisi linearizzata del modello completo in un qualsiasi istante di una simulazione dinamica. Per generare il diagramma di Campbell sono state quindi effettuate diverse simulazioni dinamiche della durata di 100 secondi, ciascuna per una diversa velocità di rotazione del rotore. L'analisi è stata svolta disattivando tutti i moduli aggiuntivi del programma. La linearizzazione viene effettuata per l'ultimo istante di ciascuna simulazione in modo da assicurarsi che il transitorio sia esaurito.

Insieme al codice FAST, NREL distribuisce dei programmi in linguaggio Matlab per l'elaborazione dei file *output* per ricavare le frequenze del modello completo.

Il confronto FAST – Cp-Lambda è effettuato sul modello *onshore* in quanto il modulo che modella il monopile in FAST, ovvero SubDyn, non permette al codice della NREL di effettuare la linearizzazione.

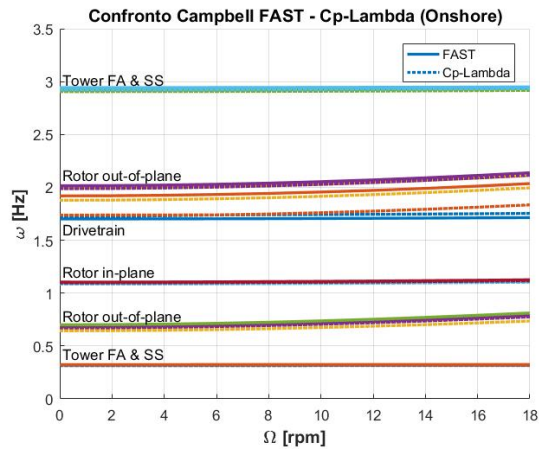


Figura 71 - Confronto diagramma di Campbell

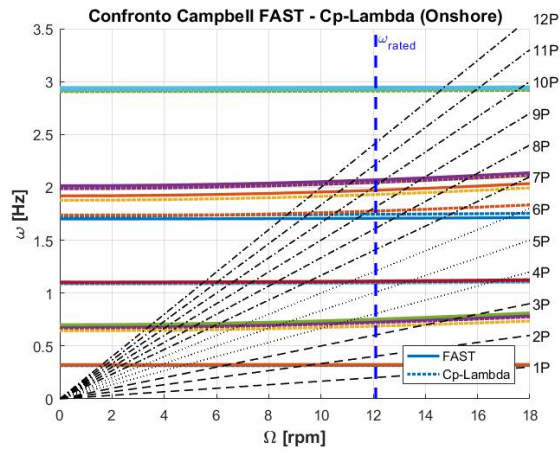


Figura 72 - Confronto diagramma di Campbell con forzanti

In Cp-Lambda invece il monopile è trattato come una estensione della torre e pertanto è possibile il calcolo del diagramma di Campbell. Per completezza dunque viene riportato il confronto tra i diagrammi dei modelli *onshore* e *offshore* calcolati con Cp-Lambda.

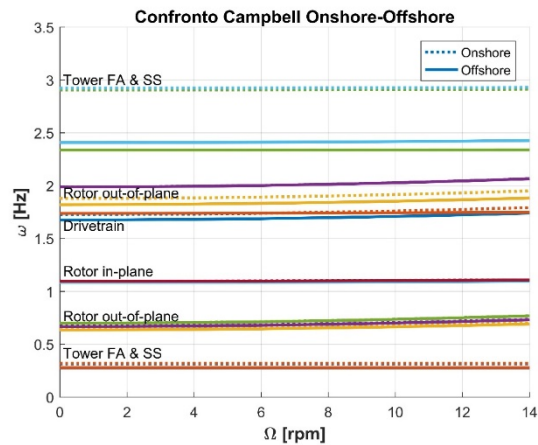


Figura 73 - Confronto diagramma di Campbell Onshore-Offshore

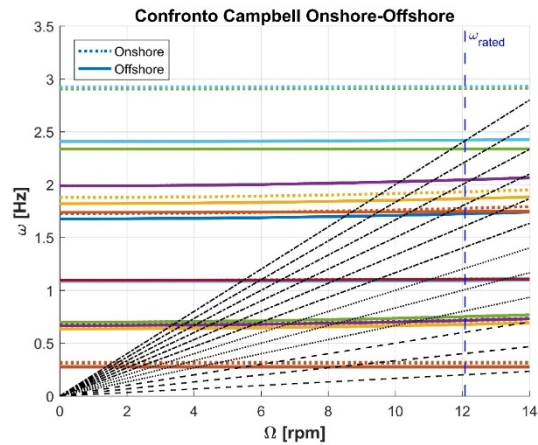


Figura 74 - Confronto diagramma di Campbell Onshore-Offshore con forzanti

B.3. Curve $C_p-\lambda$

Per la generazione delle curve $C_p-\lambda$ in FAST è stato necessario effettuare diverse simulazioni dinamiche per ciascuna condizione operativa, come nel caso del calcolo del diagramma di Campbell, di 200 secondi. In questo caso però sono stati attivati i moduli preposti al calcolo aerodinamico. Per una maggiore accuratezza dei risultati si sono tenuti disattivati i gradi di libertà del modello relativi al generatore e alla flessibilità dell'albero. Il modulo AeroDyn permette di scegliere come *output* le storie temporali dei coefficienti di coppia, potenza e trazione. Dato che per ciascuna condizione

operativa, ovvero per ciascuna simulazione, è necessario avere solo un valore di riferimento, si è presa una media dei valori dei coefficienti degli ultimi 15 secondi. Questo per assicurarsi che il valore preso come riferimento sia coerente con il reale funzionamento della macchina a transitorio esaurito.

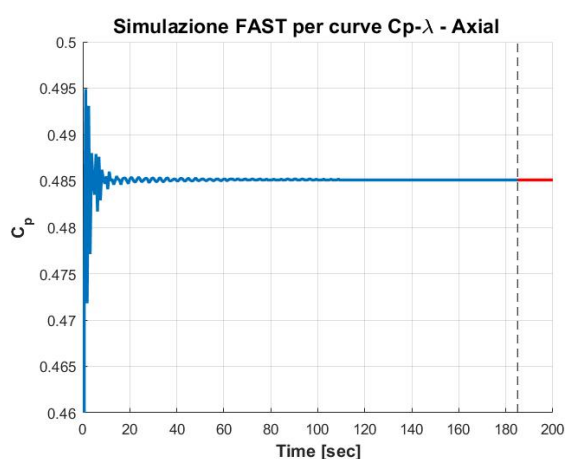


Figura 75 - Storia temporale C_p

Il codice Cp-Lambda invece permette di effettuare delle analisi statiche impostando per ciascuna di esse una velocità di rotazione del rotore fittizia. La posizione del rotore dunque rimane bloccata con la pala 1 ad un azimuth di 0° . Questa è stimata essere la condizione più prossima alla reale condizione operativa. A prova di ciò, sono state ricalcolate attraverso simulazione dinamiche alcune delle condizioni operative calcolate in precedenza. Da queste sono stati ricavati i coefficienti con lo stesso procedimento effettuato per ricavare i coefficienti con FAST.

Le curve C_p - λ sono state costruite per il modello *onshore* in due casistiche:

- caso ideale: vento assiale di 1 m/s, utile a testare la bontà dei modelli di calcolo utilizzati dai due codici;
- caso reale: vento orizzontale di 11.4 m/s, utile a confrontare le prestazioni reali dei due modelli di macchina.

Per la costruzione delle curve, per ciascuno dei due casi sono state effettuate diverse simulazioni variando la velocità di rotore (e conseguentemente il TSR) e il passo pala.

Vento assiale – 1m/s

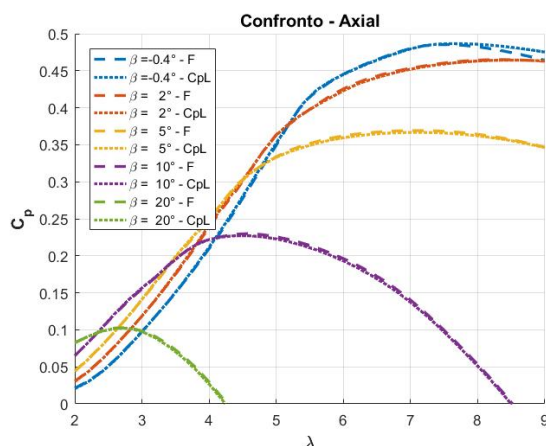


Figura 76 - Curve C_p - λ con vento assiale

Tabella 28 - Confronto valori curve C_p - λ – Caso vento assiale

	FAST	Cp-Lambda	Diff %
MaxCp	0.4854	0.4866	-0.24%
TSR @ MaxCp	7.593	7.60	-0.09%
Pitch @ MaxCp	-0.4°	-0.6°	-
MaxElTorque [kN]	3'901.80	3'901.41	0.01%
Vrated [m/s]	11.263	11.254	0.08%
Ω rated [RPM]	12.963	12.964	-0.01%

Vento orizzontale – 11.4m/s

Per il caso reale in Cp-Lambda si è aggiunta l'analisi dinamica come accennato in precedenza. I coefficienti calcolati in questo modo sono rappresentati dai punti singoli presenti in Figura 77. La sovrapposizione con le curve calcolate con l'analisi statica è indice del fatto che quest'ultima è uno strumento semplificato ma al contempo ben rappresentativo delle reali condizioni operative della macchina.

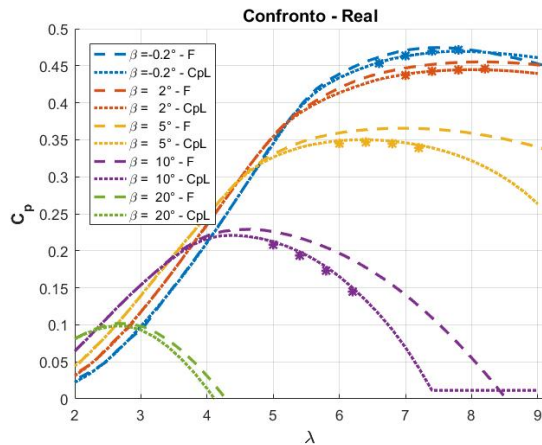


Figura 77 - Curve C_p - λ con vento orizzontale di 11.4 m/s

Tabella 29 - Confronto valori curve C_p - λ – Caso vento orizzontale

	FAST	Cp-Lambda	Diff %
MaxCp	0.4745	0.4696	1.06%
TSR @ MaxCp	7.47	7.80	-4.17%
Pitch @ MaxCp	-0.2°	-0.2°	-
MaxEITorque [kN]	3'933.87	3'756.53	4.72%
Vrated [m/s]	11.348	11.388	-0.35%
Ω rated [RPM]	12.857	13.464	-4.51%

Lo scarso accordo tra i due codici ad elevato passo è imputabile al fatto che FAST non modella la torsione. Per averne prova, si sono effettuate nuovamente le stesse curve in Cp-Lambda irrigidendo la pala a torsione. Ancora una volta, vengono riportati i punti corrispondenti all'analisi dinamica, questa volta effettuati solamente per il passo pala corrispondente a 5°.

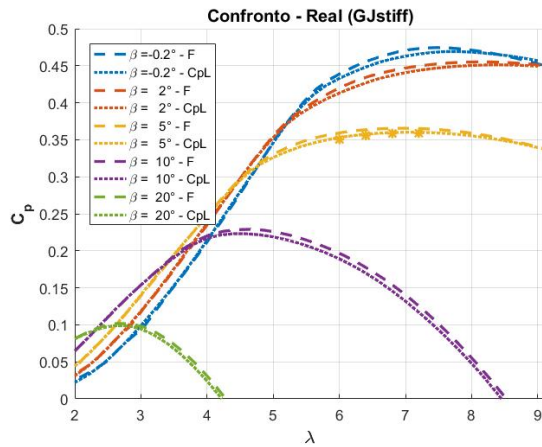


Figura 78 - Curve C_p - λ con vento orizzontale di 11.4 m/s. Pala irrigidita a torsione

Tabella 30 - Confronto valori curve C_p - λ – Caso vento orizzontale con pala irrigidita a torsione

	FAST	Cp-Lambda	Diff %
MaxCp	0.4745	0.4613	1.15%
TSR @ MaxCp	7.47	7.80	-4.17%
Pitch @ MaxCp	-0.2°	-0.2°	-
MaxElTorque [kN]	3'933.87	3'755.39	4.75%
Vrated [m/s]	11.348	11.392	-0.38%
Orated [RPM]	12.857	13.468	-4.54%

APPENDICE C

Tabelle riferite allo *swap array*

Si riportano le tabelle relative allo scambio di dati nell'accoppiamento Cp-Lambda – FAST a cui ci si riferisce nel Capitolo 5.

C.1. Cinematica piattaforma

Nella Tabella 31 sono riportate le posizioni nello *swap array* assegnate alla cinematica della piattaforma. I valori di questi sensori provengono dal codice aero-elastico e vengono inviati al codice idro-elastico tramite il Controller.

Tabella 31 - Misure scritte dal codice aeroelastico nello swap array e relative posizioni

Number	Variable Name	Description
171 – 172 – 173 174 – 175 – 176	PtfmSurge / PtfmSway / PtfmHeave PtfmRoll / PtfmPitch / PtfmYaw	Platform Displacements and Rotations
177 – 178 – 179 180 – 181 – 182	PtfmTVxi / PtfmTVyi / PtfmTVzi PtfmRVxi / PtfmRVyi / PtfmRVzi	Platform Translational and Rotational Velocities
183 – 184 – 185 186 – 187 – 188	PtfmTAXi / PtfmTAYi / PtfmTAzi PtfmRAXi / PtfmRAYi / PtfmRAzi	Platform Translational and Rotational Accelerations

C.2. Carichi piattaforma

Nella Tabella 32 sono riportate le posizioni nello *swap array* assegnate ai carichi agenti sulla piattaforma. I valori di questi sensori provengono dal codice idro-elastico e vengono inviati al codice aero-elastico tramite il Controller, il quale ha il compito di comandare gli attuatori di forza e momento.

Tabella 32 - Output della DLL di FAST e relative posizioni nello swap array

Number	Variable Name	Description
189	PtfmSurge_FX	Platform Surge Force
190	PtfmSway_FY	Platform Sway Force
191	PtfmHeave_FZ	Platform Heave Force
192	PtfmRoll_MX	Platform Roll Moment
193	PtfmPitch_MY	Platform Pitch Moment
194	PtfmYaw_MZ	Platform Yaw Moment