



**Politecnico
di Torino**

Collegio di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Meccanica indirizzo Produzione Meccanica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Modello dinamico a sei gradi di libertà e
design logiche di controllo PID e FUZZY
di una imbarcazione foilante con
valutazione dei consumi per alimentazioni
elettriche e ad idrogeno**

Relatore/i

prof. Mauro Bonfanti

Candidato

Gabriele Deflorio

31 Marzo 2025

Abstract

Negli ultimi anni le barche foilanti sono la punta di diamante nell'innovazione della nautica da competizione, e l'interesse per implementare questa tecnologia nel mondo della nautica da diporto è in forte ascesa. I principali vantaggi di queste tecnologie sono l'incremento di prestazioni, l'eliminazione dell'onda di scia e la riduzione dei consumi, minimizzando l'impatto ambientale sulle acque costiere, favorendo un'ampia diffusione di queste soluzioni in tutto il settore nautico. I principali obiettivi della ricerca spingono sull'efficientamento energetico attraverso l'implementazione di sistemi di controllo attivi per migliorare la stabilità e il confort. Si studiano inoltre configurazioni di alimentazioni ibride, elettriche e a idrogeno per ridurre le emissioni. La tesi vuole contribuire alla ricerca in questo senso, attraverso la creazione di un modello dinamico a 6 gradi di libertà (6DOF) che consente di analizzare accuratamente le forze e i momenti in gioco sul sistema, permettendo di ottimizzare le prestazioni ed il design dell'imbarcazione e sviluppare strategie di controllo avanzate. L'imbarcazione di riferimento è di medie dimensioni destinata alla nautica da diporto.

Lo scopo di questo progetto di tesi è studiare la transizione dell'imbarcazione dal regime dislocante al regime foilante, dapprima in un ambiente marino indisturbato, al quale poi vengono implementate delle perturbazioni, al fine di analizzarne il comportamento dinamico e la robustezza del controllo. Il modello dinamico è stato creato sfruttando l'ambiente di simulazione di Matlab – Simulink, tramite la creazione di blocchi rappresentanti le correlazioni fisiche del sistema. I controlli sviluppati riguardano la gestione della forza propulsiva della motorizzazione al fine di garantire una propulsione regolare che non intacchi la stabilità del sistema e che permetta di creare uno strumento di previsione del consumo dell'alimentazione in termini di energia e potenza. Il controllo ha come focus l'assetto e la quota dell'imbarcazione tramite l'azione sui flaps terminali sul bordo di uscita delle appendici orizzontali dei foil. Il controllo dei flaps di un'imbarcazione foilante può essere gestito tramite controllori PID (Proportional Integrative Derivative) con l'obiettivo di correggere l'errore tra assetto desiderato ed il valore misurato.

In questo lavoro di tesi viene sviluppato il controllo tramite logica FUZZY, una teoria logico-matematica che tende ad eliminare la discontinuità che si ha con la logica tradizionale binaria, valutando attraverso regole linguistiche una superficie di controllo progettata sulla combinazione di funzioni di appartenenza definite per gli input. Essa permette di ottimizzare il controllo al fine di migliorare le performance dell'imbarcazione e adattarsi in modo efficace alle variazioni regime. Entrambe le metodologie di controllo vengono sottoposte a vari scenari di perturbazione dai quali si confrontano la stabilità, la robustezza e la risposta del sistema. In ultima analisi i dati ottenuti dalle simulazioni si elaborano per identificare la potenza richiesta dal sistema in diversi scenari di funzionamento. Si effettuano valutazioni di consumo e di configurazione per due diverse motorizzazioni, sia elettrica che ad idrogeno, evidenziandone i vantaggi in termini di peso e volume.

Indice

1	Introduzione	3
1.1	Stato dell'arte	3
1.2	Struttura e obiettivi della tesi	5
2	Modello dinamico a sei gradi di libertà.....	6
2.1	Modellazione dinamica di imbarcazioni foilanti.....	6
2.2	Dati di input e sistemi di riferimento	8
2.3	Moduli delle forze	13
2.4	Coefficienti idrodinamici appendici alari	15
3	Controllo	18
3.1	Logica di Controllo PID	19
3.2	Logica controllo FUZZY	26
3.2.1	Principi logica FUZZY	27
3.2.2	Applicazione logica FUZZY per controllo assetto-quota.....	33
3.2.3	Applicazione logica FUZZY per la forza propulsiva.....	40
4	Risultati.....	45
4.1	Risultati modello indisturbato	45
4.2	Impostazione disturbi e risultati a confronto	53
5	Tool di valutazioni power train e consumi	63
5.1	Obbiettivi	63
5.2	Sviluppo del Tool.....	64
5.3	Descrizione degli scenari	66
5.4	Risultati della valutazione	67
6	Conclusioni e sviluppi futuri.....	71
7	Riferimenti.....	73

1 Introduzione

1.1 Stato dell'arte

Le imbarcazioni foilanti sono natanti dotati di appendici idrodinamiche, chiamate HYDROFOIL, che grazie alla generazione di portanza idrodinamica sono in grado di sollevare lo scafo al di sopra della superficie dell'acqua riducendo significativamente la resistenza all'avanzamento. Questo permette di raggiungere elevate velocità con una significativa riduzione dei consumi rispetto alle imbarcazioni tradizionali. Le imbarcazioni foilanti trovano applicazione in diversi ambiti: competizioni veliche, settore sportivo o ricreativo, trasporto marittimo e nel settore militare. L'adozione di queste tecnologie rappresenta una svolta significativa per il settore navale, alcuni dei principali vantaggi sono:

- Il miglioramento dell'efficienza energetica: riducendo il consumo di carburante, ottimizzando le prestazioni della motorizzazione e dell'imbarcazione nel complesso;
- La riduzione dell'impatto ambientale: riducendo il consumo di energia si riducono le emissioni, si riduce l'impatto sonoro e gli effetti di scia delle carene;
- L'aumento significativo delle velocità di navigazione;
- Il miglioramento delle condizioni di comfort e sicurezza di navigazione.

Un'azienda leader nel settore è l'azienda Candela che ha sviluppato diverse tipologie di imbarcazioni foilanti e con esse tecnologie innovative di motorizzazione, ricevendo molteplici riconoscimenti nel settore e stabilendo record di vendite a livello internazionale.

Esempio principale di questo lavoro di tesi è il modello Candela C-7 [1], la prima imbarcazione elettrica foilante prodotta in serie, che ha registrato record di vendite in Europa e ha vinto numerosi riconoscimenti per le tecnologie innovative con essa introdotte, permettendo una riduzione di energia dell'80% rispetto ad altre imbarcazioni convenzionali [2].

Un importante traguardo per questa imbarcazione è stato raggiunto durante la Monaco Energy Challenge [3], che è la più grande competizione al mondo rivolta ad imbarcazioni che introducono tecnologie all'avanguardia nel settore nautico, in cui si è aggiudicata la vittoria della gara sprint di 1/8 di miglio nautico con una media di 27 nodi e velocità di picco fino a 31 nodi, nonostante le condizioni avverse del mare, e battendo le altre imbarcazioni tradizionali con motorizzazioni di centinaia di cavalli rispetto agli 87 cavalli di cui è dotata.



Figura 1.1 Candela boat modello C-7 [1].

L'azienda ha inserito in produzione nuovi modelli come il Candela C-8 Polestar Edition, sviluppato in collaborazione con l'omonima azienda in termini di design che di tecnologie [4] [5], portando alla massima espressione il comfort di navigazione e il lusso delle imbarcazioni day cruiser.

Inoltre, l'azienda svedese introduce un'evoluzione nel settore dei mezzi di trasporto urbano in località in cui è possibile sfruttare i corsi d'acqua per collegati nevralgici. Il modello proposto si chiama Candela P-12 [6], un traghetto in servizio sulla città di Stoccolma [7] che permette di abbattere i consumi di energia, l'inquinamento sonoro nella città, ridurre i tempi di navigazione e i costi rispetto ai tradizionali traghetti urbani.



Figura 1.2 Candela boat modello P-12 [6].

1.2 Struttura e obiettivi della tesi

Le motivazioni principali del progetto di tesi fondano le radici nella passione per il settore della nautica e per il personale diretto coinvolgimento nell'attività del team studentesco *Polito Sailing Team* [8], dove la sfida è colmare il divario tra la fase di progettazione e produzione di imbarcazioni foilanti da competizione, con l'obiettivo raggiungere alte prestazioni, comfort e controllo.

Pertanto, l'obiettivo dell'elaborato della tesi è di sviluppare un modello dinamico di un'imbarcazione foilante paragonando due logiche di controllo, una tradizionale ed una innovativa, per gestire l'assetto e la quota di volo dell'imbarcazione. Il campo di applicazione è quello delle imbarcazioni foilanti, precedentemente descritto, la cui forza motrice è imposta da una elica motorizzata da sistema di alimentazione, che fornisce la potenza in base allo stile di guida del conducente. Si sviluppano delle curve di alimentazione per simulare tale spinta propulsiva. Infine, si valuta l'applicazione di due differenti motorizzazioni, per l'imbarcazione definita nel modello dinamico, una elettrica e l'altra con celle a combustibile a idrogeno, su differenti scenari di autonomia, carico ed in condizioni di stress, dovuto a disturbi esterni, valutando l'impatto in termini di massa e volume.

La struttura della tesi parte dalla modellazione di un sistema dinamico a sei gradi di libertà sfruttando l'ambiente di simulazione MATLAB Simulink. Quindi nel capitolo 2 si analizza la fisica in gioco nel sistema per la creazione del modello dinamico nei sei gradi di libertà, attraverso il quale si può valutare stabilità e robustezza dello stesso.

Per garantire la stabilità del sistema è stata fondamentale la progettazione delle logiche di controllo di volo. Nel capitolo 3 sono analizzate due logiche di controllo per la gestione della quota e dell'assetto, la tradizionale logica dei controllori PID, e a confronto è stato progettato un controllore FUZZY in grado di sostituire i classici approcci di controllo.

Nel capitolo 4, per la stessa imbarcazione di riferimento per cui è stato progettato il modello dinamico, si espongono i risultati a confronto delle due logiche di controllo di assetto e quota di volo, valutando la fase transitoria di decollo e quella di regime all'equilibrio, che viene sottoposta a disturbi esterni di varie tipologie, al fine di valutarne la stabilità del sistema e la robustezza del controllo.

Nel capitolo 5 è presentata un'analisi per la valutazione dei parametri principali di performance di consumo, con l'obiettivo di evidenziare i vantaggi e gli svantaggi dei due tipi di motorizzazioni utilizzate, a idrogeno ed elettrica.

2 Modello dinamico a sei gradi di libertà

Le imbarcazioni foilanti rappresentano una delle evoluzioni più significative dell'ingegneria nautica. Queste sfruttano appendici idrodinamiche, note come foils, che permettono di sollevare lo scafo dalla superficie del mare e ridurre significativamente la resistenza al moto, permettendo di raggiungere elevate velocità di navigazione e un minor consumo energetico rispetto alle tradizionali imbarcazioni dislocanti.

Per analizzare e progettare tali imbarcazioni è fondamentale sviluppare un accurato modello dinamico che simuli il comportamento fisico del sistema. L'ambiente di simulazione MATLAB Simulink rappresenta lo strumento ideale per questa analisi, permettendo di implementare le equazioni differenziali del secondo ordine non lineari, che descrivono la dinamica del sistema, ed integrare modelli di controllo e simulazioni di interazione fluido-strutturali.

2.1 Modellazione dinamica di imbarcazioni foilanti

Le equazioni del problema dinamico del sistema sono descritte dalle leggi di Newton-Eulero nei sei gradi di libertà per il moto traslazionale e rotazionale [9]. La configurazione dell'imbarcazione e dei FOILS introducono effetti non lineari che devono essere considerati nel modello. Le equazioni del moto nei sei gradi di libertà, nel sistema di riferimento definito nel centro di gravità dell'imbarcazione, sono sintetizzate nella seguente formulazione vettoriale:

$$M_{RB} \dot{v} + C_{RB}(v)v = \tau_{RB}$$

In cui il vettore v identifica il vettore di velocità lineari ed angolari, la matrice M_{RB} è la matrice di inerzia sistema, in cui m indica la massa totale, $I_{3 \times 3}$ la matrice identità, I^b il tensore d'inerzia rispetto al centro del sistema di riferimento, C_{RB} rappresenta la matrice di Coriolis e delle forze centripete, $S()$ è un operatore matriciale e τ è il vettore generalizzato delle forze e dei momenti esterni. Il vettore delle forze e dei momenti esterni contiene tutte le forze sviluppate dal sistema.

$$v = \begin{bmatrix} v_{b/n}^b \\ \omega_{b/n}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}; \quad \tau_{RB} = \begin{bmatrix} f_b^b \\ m_b^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ K \\ M \\ N \end{bmatrix}$$

$$M_{RB} = \begin{bmatrix} mI_{3 \times 3} & -mS(r_g^b) \\ mS(r_g^b) & I^b \end{bmatrix}$$

$$C_{RB} = \begin{bmatrix} mS(\omega) & -mS(\omega)S(r_g^b) \\ mS(r_g^b)S(\omega) & S(I^b\omega) \end{bmatrix}$$

Attraverso blocchi funzionali sviluppati in ambiente MATLAB Simulink è stato possibile costruire i vettori di tutte le forze e i momenti, nei sei gradi di libertà, verificando la correttezza dei diagrammi di corpo libero del sistema. Questi vettori sono combinati in un unico vettore risultante τ . Attraverso gli operatori matriciali $H(r)$ ed $S(r)$ avviene l'assemblaggio delle forze espresse nei propri punti di applicazione e che vengono roto-traslate nel sistema di riferimento *Body* centrato nel baricentro dell'imbarcazione.

$$S(r) = \begin{bmatrix} 0 & -r(3) & r(2) \\ r(3) & 0 & r(1) \\ -r(2) & -r(1) & 0 \end{bmatrix} \quad H(r) = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} \\ S(r) & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$R_{x,\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{pmatrix}; \quad R_{y,\theta} = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix}; \quad R_{z,\psi} = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_f^b(\Theta_b^n) = R_{z,\psi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\phi}$$

$$f_{RB}^b = H(r) R_f^b(\Theta_b^n) f_{i-element}$$

Per risolvere il problema differenziale si è sfruttato il Toolbox Aerospace [10]. Questo strumento permette di valutare l'andamento degli stati del sistema in termini di posizioni, velocità e accelerazioni lineari e angolari, attraverso i quali poter correlare tutti i blocchi funzionali del sistema, rendendoli direttamente dipendenti dal valore dello stato ottenuto come soluzione del problema differenziale nel tempo di integrazione precedente.

In questo strumento vengono inseriti i vettori risultanti di forze e momenti esterni, la massa e la matrice di inerzia ed è possibile inizializzare le condizioni di simulazione di partenza degli stati del sistema seguenti:

- Posizioni iniziali rispetto al sistema di riferimento inerziale Earth;
- Velocità iniziali rispetto al sistema di riferimento Body fissato nel baricentro dell'imbarcazione;
- Condizioni iniziali di orientazione degli angoli di Eulero;
- Velocità angolari iniziali rispetto al sistema di riferimento Body.

Per rendere il modello gestibile a livello computazionale si adottano alcune ipotesi alla base di formulazione [9] [11]:

- posizione del baricentro dell'imbarcazione fissa;
- rigidità strutturale dell'imbarcazione e delle appendici;
- incomprimibilità del fluido;
- fluidi in condizioni di flusso stazionario;
- assenza di interferenze tra le appendici anteriori, posteriori e propulsione;
- centro di pressione delle appendici verticali posizionato sull'asse dei rispettivi foil;
- centro di pressione collocato nella mezzeria tra FOILS e superficie dell'acqua;
- coefficienti aerodinamici e fluidodinamici relativi allo scafo considerati costanti.

2.2 Dati di input e sistemi di riferimento

Per la progettazione del sistema dinamico le informazioni iniziali definiscono le masse in gioco del sistema, l'accelerazione gravitazionale, la densità e viscosità dell'acqua e densità dell'aria, le dimensioni dell'imbarcazione e delle appendici, le aree aerodinamiche dei FOILS e dei verticali.

Nome	Simbolo	Valore	Unità di misura
Massa totale	m	800	Kg
Acc. gravitazionale	G	9.81	m/s ²
Densità aria	ρ_{aria}	1000	Kg/m ³
Densità acqua	ρ_{acqua}	1.125	Kg/m ³
Viscosità acqua	μ_{acqua}	8.9E-4	Pa·s
Lunghezza scafo	l_{boat}	8	m
Altezza scafo	h_{boat}	0.8	m
Larghezza scafo	y_{boat}	5	m
LarghezzaFOILant.	l_{main_foil}	0.5	m
LarghezzaFOILpost.	l_{rudd_foil}	0.3	m
Corda aerod. ant.	c_{main_foil}	0.25	m
Corda aerod. post.	c_{rudd_foil}	0.15	m
Lunghezza verticali	l_{vert_foil}	1.6	m
Corda verticali	c_{vert_foil}	0.2	m

Tabella 2.1 Parametri dell'imbarcazione e delle appendici.

Le superfici delle appendici dei FOILS e dei verticali vengono calcolate con la formula seguente:

$$S_{i-foil} = \frac{3}{4} \cdot l_{i-foil} \cdot c_{i-foil}$$

Viene definito il sistema di riferimento Body centrato in corrispondenza del centro di massa dello scafo. Vengono definiti rispetto al sistema di riferimento Body tutti i sistemi di riferimento relativi a:

- centro di spinta aerodinamica dello scafo;
- centro di spinta idrodinamica dello scafo;
- baricentro dello scafo;
- dei centri aerodinamici dei FOILS di appendici anteriori e posteriori e dei relativi verticali;
- motorizzazione che applica la forza di spinta.

Fondamentale è identificare i sistemi di riferimento per ogni elemento del sistema per poter diagrammare opportunamente i centri di applicazione delle forze e poter, dai diagrammi di corpo libero del sistema, scrivere le equazioni di equilibrio del moto.

Si distinguono tre principali sistemi di riferimento [9] [12] :

- sistema di riferimento Earth;
- sistema di riferimento Body;
- sistema di riferimento Flow.

Il sistema di riferimento Earth è un sistema di riferimento inerziale fissato in una posizione arbitraria sulla superficie del mare. Questo sistema di riferimento viene utilizzato identificare la quota e posizione longitudinale e trasversale dello scafo. Per convenzione l'asse su cui misurare la quota è rivolto verso il basso e l'asse trasversale segue la regola della mano destra.

Inoltre, questo sistema di riferimento viene sfruttato per introdurre dei disturbi di onda che influenzano le misurazioni della quota di volo dell'imbarcazione. Si definisce nelle seguenti equazioni la terna di assi, chiamati Nord East Down, centrata in O_n :

$$p_{b/n}^n = [N, E, D] \in R^3$$

$$\theta_{nb} = [\varphi, \theta, \psi] \in S^3$$

$$\eta = \begin{bmatrix} p_{b/n}^n \\ \theta_{nb} \end{bmatrix}$$

Il sistema di riferimento Body è solidale al corpo in un punto con un'orientazione arbitraria. Tipicamente l'origine è situata nel centro di massa del corpo e l'asse X è rivolto nella direzione del moto di avanzamento. Anche in questo caso l'asse Z è rivolto verso il basso, verso ciò che per il corpo è identificato come basso. La rotazione intorno al terzo asse identifica il beccheggio dell'imbarcazione o del FOIL ed è definita positiva per uno spostamento della punta dell'imbarcazione o del FOIL verso l'alto, come si osserva nella seguente figura.

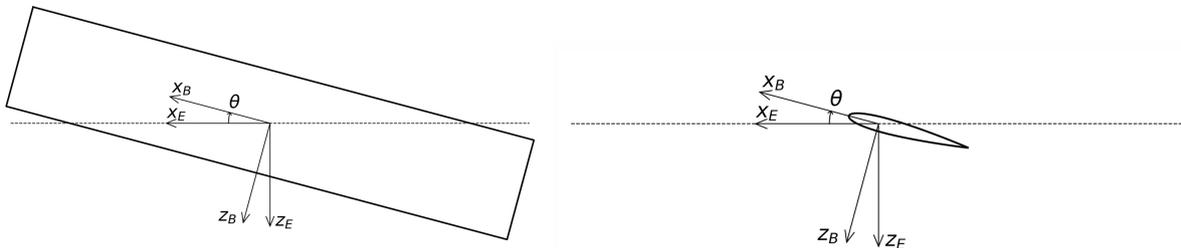


Figura 2.1 Sistema di riferimento Body centrato nel baricentro dello scafo e nel centro aerodinamico del profilo alare [12].

Per il sistema di riferimento Body si possono identificare i vettori di velocità traslazionali e rotazionali che si esprimono come:

$$v_{b/n}^b = [u, v, w] \in R^3$$

$$\omega_{b/n}^b = [p, q, r] \in R^3$$

$$v = \begin{bmatrix} v_{b/n}^b \\ \omega_{b/n}^b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{bmatrix}$$

Il sistema di riferimento Flow rappresenta l'interazione tra il fluido ed i FOILS ed è fondamentale per valutare la portanza e la resistenza delle appendici, in funzione del legame tra velocità del flusso ed angolo di incidenza dello stesso sull'appendice. L'origine del sistema è definita sul centro aerodinamico dei profili alari, rispetto al quale si definiscono la portanza ortogonale al flusso in ingresso e la resistenza parallela ad esso. La rotazione di questo sistema di riferimento varia con la direzione della velocità del flusso in ingresso. È possibile identificare la rotazione del sistema Flow rispetto al sistema Body attraverso l'angolo di incidenza α , come mostrato in Figura 2.2.

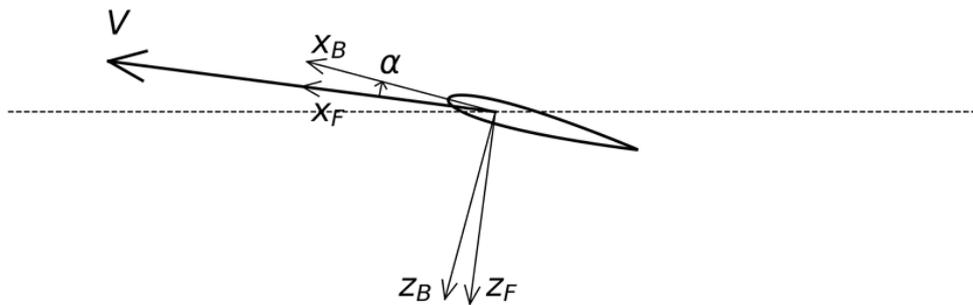


Figura 2.2 Sistema di riferimento Flow centrato nel centro aerodinamico del profilo alare [12].

Il vettore velocità definito nel sistema Flow può essere espresso nel sistema di coordinate Body attraverso la matrice di rotazione $R_{y,\alpha}$ [9]. Ne segue che:

$$R_{y,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & 0 & \sin(\alpha) \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}^b = (R_{y,\alpha})^T \mathbf{v}^{\text{flow}} \quad \Leftrightarrow \quad \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R_{y,\alpha}^T \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Inoltre, per completare la trasformazione da assi Flow ad assi Body bisogna considerare un'ulteriore rotazione legata all'*angolo di scarroccio* β , attraverso il sistema di riferimento di stabilità e la matrice di rotazione $R_{z,-\beta}$ [12]:

$$R_{z,-\beta} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & \sin(\beta) & 0 \\ -\sin(\beta) & \cos(\beta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{v}^{\text{stab}} = (R_{z,-\beta})^T \mathbf{v}^{\text{flow}}$$

Allora l'angolo di attacco e l'angolo di scarroccio, nell'ipotesi di piccole oscillazioni, per un'imbarcazione che si muove a velocità costante positiva $U > 0$ e $u \approx U$ possono essere espressi come segue:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{w}{u} \right) \Rightarrow \alpha \approx \frac{w}{u}$$

$$\beta = \sin^{-1} \left(\frac{v}{u} \right) \Rightarrow \beta \approx \frac{v}{u}$$

In definitiva possiamo definire la matrice di rotazione da sistema Flow a sistema Body come:

$$R_b^{flow} = R_{y,\alpha} \cdot R_{z,-\beta} = \begin{bmatrix} \cos(\beta) \cos(\alpha) & \sin(\beta) & \cos(\beta) \sin(\alpha) \\ -\sin(\beta) \cos(\alpha) & \cos(\beta) & -\sin(\beta) \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & 0 & \cos(\alpha) \end{bmatrix}$$

$$v^b = (R_b^{flow})^T v^{flow} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = R_{y,\alpha}^T R_{z,-\beta}^T \begin{bmatrix} U \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Analogamente è necessario trasformare i vettori relativi alla forza peso e alla forza di galleggiamento dello scafo definiti nel sistema di riferimento Earth rispetto al sistema di riferimento Body.

Per un generico vettore forza f_i^n espresso in coordinate Earth la relazione tra questi due sistemi di coordinate è espressa attraverso le matrici di rotazione che sfruttano gli angoli di Eulero precedentemente definiti.

$$f_i^n = [f_x^n, f_y^n, f_z^n] \in R^3$$

$$R_b^n(\theta_{nb}) = R_{z,\psi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{x,\phi}$$

$$R_{x,\phi} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c\phi & -s\phi \\ 0 & s\phi & c\phi \end{pmatrix}; \quad R_{y,\theta} = \begin{pmatrix} c\theta & 0 & s\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -s\theta & 0 & c\theta \end{pmatrix}; \quad R_{z,\psi} = \begin{pmatrix} c\psi & -s\psi & 0 \\ s\psi & c\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Dove $c = \cos()$ e $s = \sin()$.

Allora il vettore relativo alla forza i -esima definita in assi Earth f_i^n può essere espressa in assi Body attraverso la relazione:

$$f_i^b = (R_b^n(\theta_{nb}))^T f_i^n$$

2.3 Moduli delle forze

Le forze esterne possono essere condensate in un unico vettore espresso nei sei gradi di libertà composto dalla somma dei seguenti termini:

- forza peso, che agisce verticalmente verso il basso;
- forza propulsiva, dovuta alle vele oppure, come in questo caso, dalla motorizzazione;
- forze idrostatiche dovute alla porzione di scafo immerso;
- resistenze idrodinamiche dovute alla porzione di scafo immerso in acqua;
- forze aerodinamiche legate alla resistenza dello scafo con l'aria;
- forze idrodinamiche generate dai FOILS e dalle appendici verticali:
 - portanza;
 - resistenza;
 - momento.

Per ciascuna di queste forze sono definiti dei sistemi di riferimento relativi e viene identificato in essi il punto di applicazione delle stesse. Questi vettori vengono opportunamente roto-traslati sul sistema di riferimento Body centrato nel baricentro dell'imbarcazione per il quale si risolvono le equazioni di equilibrio del sistema.

La forza peso è applicata nel baricentro dell'imbarcazione moltiplicando la massa totale per l'accelerazione gravitazionale. Questa forza deve essere sempre rivolta verso il basso, perciò viene moltiplicata per una matrice di rotazione che scompone tale forza dal sistema di riferimento Earth al sistema di riferimento Body dello scafo.

La forza propulsiva applicata dall'elica motorizzata è stata modellata attraverso un sistema FUZZY con l'obiettivo di combinare, attraverso un set di regole, i valori letti in input e fornire un insieme di curve di alimentazione progettate con lo scopo di replicare la dinamica propulsiva di una motorizzazione; verrà trattata successivamente nel capitolo relativo alle logiche di controllo FUZZY.

La forza di galleggiamento è applicata nel centro di spinta ed è anche essa rivolta nel sistema Earth verso l'alto, quindi attraverso le matrici di rotazione si scompongono le sue componenti e vengono riferite al sistema Body dello scafo. Questa forza dipende dalla superficie dell'imbarcazione immersa, quindi ha un valore diverso da zero fin quando lo scafo è immerso. Viene calcolata come:

$$F_A = \rho_w S_{imm} d_{hull} g$$

Fin tanto che parte dell'imbarcazione è immersa si considera diverso da zero il valore della resistenza idrodinamica dello scafo che si muove nel mezzo fluido acqua, identificata dall'equazione:

$$D_{hull,w} = \frac{1}{2} \rho_w S_{imm} C_D V^2$$

Analogamente si definiscono le forze aerodinamiche dello scafo in moto nel mezzo fluido aria rispetto al centro aerodinamico, ipotizzato coincidente con il centro di gravità del sistema. Le equazioni relative a queste forze sono:

$$L_{hull,air} = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_L V^2$$

$$D_{hull,air} = \frac{1}{2} \rho_{air} S C_D V^2$$

I coefficienti idrodinamici e aerodinamici relativi alle formule precedenti vengono assunti costanti e sono identificati da letteratura.

Particolare attenzione è posta sulla determinazione delle azioni idrodinamiche delle superfici alari di portanza resistenza e momento, che possono essere espresse dalle seguenti formule:

$$L = \frac{1}{2} \rho S C_L V^2$$

$$D = \frac{1}{2} \rho S C_D V^2$$

$$M = \frac{1}{2} \rho S C C_M V^2$$

Dove V è il modulo della velocità, S la superficie in pianta dell'appendice, C la corda media del profilo, C_L , C_D , C_M sono i coefficienti aerodinamici dei profili alari.

I coefficienti aerodinamici possono essere espressi analiticamente dalle espressioni [11]:

$$c_L = c_{L\alpha}(\alpha_{locale} - \alpha_0 + i)$$

$$c_D = c_D + \frac{C_L^2}{e\pi\lambda}$$

$$c_M = c_{M\alpha}(\alpha_{locale} - \alpha_0 + i)$$

Dove α_0 è l'incidenza di portanza nulla ed i rappresenta il calettamento dell'appendice, che contiene l'angolo di calettamento di montaggio del profilo e i contributi di angolo di attacco dovuti ai controllori e a fenomeni fisici trattati in seguito.

2.4 Coefficienti idrodinamici appendici alari

La determinazione dei coefficienti aerodinamici e idrodinamici rappresenta un aspetto cruciale per la determinazione delle forze di portanza e resistenza. Essi sono essenziali per implementare correttamente le forze aerodinamiche e idrodinamiche nel modello MATLAB Simulink.

Questi vengono ottenuti dalla lettura dei codici tabulati relativi alle polari dei profili alari selezionati per le appendici verticali e per i FOILS. I dati C_D , C_L , C_M vengono selezionati in funzione del numero di Reynolds e dell'angolo di attacco tra profilo alare e flusso d'acqua incidente, attraverso delle *look-up table*.

$$R_e = \frac{\rho_w}{\mu_w} c_{i-appendix} V_{module}$$

L'angolo di attacco delle appendici aerodinamiche è identificato dall'angolo di calettamento, con cui è montato il profilo alare, a cui vengono sommati i contributi dovuti alle attuazioni dei flaps, gestiti dai controllori, e contributi dovuti a fenomeni fisici legati all'interazione con la superficie dell'acqua o fenomeni fisici di sollevamento e di rotazione intorno agli assi dello scafo. L'angolo di attacco risultante è quindi pari alla sommatoria espressa nella seguente equazione:

$$\alpha_{AoA,i-foil} = \alpha_{0,i-foil} + \Delta\alpha_{Control,i-foil} + \Delta\alpha_{uw} + \Delta\alpha_{pitch\ rate,i-foil} + \Delta\alpha_{roll\ rate,i-foil}$$

Analogamente, per i verticali è possibile definire i rispettivi angoli di attacco del flusso di fluido sull'appendice, fondamentali per la modellazione ed il controllo della dinamica a sei gradi di libertà dell'imbarcazione. Il termine relativo al calettamento delle appendici risulta nullo e le appendici hanno un profilo alare simmetrico. Solo il profilo alare relativo al timone presenta un contributo dovuto ai controllori che indica la rotazione del timone al fine di garantire obiettivi di rotta desiderati.

$$\beta_{AoA,i-vert} = \beta_{0,i-vert} + \Delta\beta_{Control,i-vert} + \Delta\beta_{yaw\ rate,i-vert} + \Delta\beta_{roll\ rate,i-vert}$$

La qualità del modello dipende dall'accuratezza con cui si descrivono i fenomeni fisici coinvolti. È stata fondamentale la valutazione degli effetti dinamici dovuti agli spostamenti e alle rotazioni dell'imbarcazione rispetto al fluido in cui si muove. Tali fenomeni sono detti *effetti di smorzamento* e causano una variazione dell'angolo di attacco effettivo del flusso sui FOILS e sulle appendici, rispetto a condizioni stazionarie, provocando una variazione di intensità delle forze di portanza e di resistenza.

Quando l'imbarcazione si solleva per $w < 0$ l'incidenza del fluido sui FOILS cambia, provocando una diminuzione dell'angolo di attacco e conseguente riduzione della portanza generata. Il contributo di variazione dell'angolo di attacco dovuto a questo effetto è analogo per tutti i FOILS dell'imbarcazione ed è quantificabile dall'espressione seguente:

$$\Delta\alpha_{uw} = \text{arctg}\left(\frac{w}{u}\right)$$

Lo stesso principio si applica in caso di rotazioni di beccheggio, rollio e imbardata, ma a differenza del caso precedente, l'effetto delle velocità angolari sul moto relativo tra appendici e fluido provocano variazioni non simmetriche degli angoli di attacco sulle varie appendici.

Tali fenomeni fisici sono applicati sia per i FOILS che per le appendici verticali; segue un'indagine dettagliata della variazione degli angoli di attacco per entrambe le tipologie di profili alari in risposta al cambiamento di assetto dell'imbarcazione. Ricordando che l'imbarcazione presenta due FOILS anteriori ed un FOIL posteriore.

I FOILS orizzontali hanno lo scopo di sollevamento dell'imbarcazione e vengono regolati per garantire stabilità, principalmente a beccheggio e a rollio. La rotazione in imbardata provoca effetti trascurabili sull'angolo di attacco.

Per una rotazione di un angolo di beccheggio $\theta > 0$ i due FOILS anteriori subiscono una riduzione dell'angolo di attacco del flusso, mentre il FOIL posteriore, muovendosi verso il basso, sperimenta un aumento dell'angolo di attacco. Tali contributi vengono valutati in base al braccio lungo l'asse longitudinale, ed al segno dello stesso rispetto all'origine del sistema di riferimento Body nel baricentro dell'imbarcazione, dalla formula:

$$\Delta\alpha_{pitch\ rate,i-foil} = \text{arctg}\left(\frac{q \cdot r_{x\ i-foil}}{u}\right)$$

Per una rotazione di un angolo positivo di rollio $\varphi > 0$ i FOILS che emergono sperimentano una riduzione di angolo di attacco mentre quello che si immerge maggiormente sperimenta un aumento dell'angolo di attacco. Tali contributi sono calcolati dalla formula:

$$\Delta\alpha_{roll\ rate,i-foil} = \text{arctg}\left(\frac{p \cdot r_{y\ i-foil}}{u}\right)$$

Le appendici verticali offrono stabilità all'imbardata ed al rollio mentre l'effetto al beccheggio risulta poco influente, quindi trascurabile.

Per una rotazione di un angolo positivo di imbardata $\psi > 0$ le appendici verticali anteriori sperimentano una variazione dell'angolo di attacco positiva mentre quella posteriore avrà una variazione di angolo di attacco nella direzione opposta.

$$\Delta\beta_{yaw\ rate,i-vert} = \arctg\left(\frac{r \cdot r_{y\ i-vert}}{u}\right)$$

L'influenza del rollio sull'angolo di attacco segue lo stesso principio visto per i FOILS orizzontali ed è valutata con l'espressione:

$$\Delta\beta_{roll\ rate,i-vert} = \arctg\left(\frac{p \cdot r_{z\ i-vert}}{u}\right)$$

Un altro fenomeno fisico tenuto in considerazione è relativo all'interazione delle appendici alari con la superficie dell'acqua, che influenza notevolmente le prestazioni idrodinamiche delle stesse. Quando un'appendice alare si avvicina al pelo libero dell'acqua, la pressione dell'aria provoca una riduzione del campo di pressioni sui FOILS, provocando una riduzione di efficienza, quindi riducendo la capacità di generare portanza.

Inoltre, la vicinanza alla superficie dell'acqua provoca una distorsione delle linee di flusso aumentando la resistenza indotta, e si possono verificare effetti ventilanti, in cui si interrompono le linee di flusso sul dorso del FOIL provocando un'improvvisa riduzione di portanza e un aumento di resistenza. Questi fenomeni vengono rappresentati nel modello dinamico con un termine moltiplicativo applicato ai coefficienti fluidodinamici identificati precedentemente, secondo le equazioni seguenti:

$$FS_{C_L} = -0,422 \cdot e^{\left(\frac{depth_{i-appendix}}{chord_{i-appendix}} - 1.454\right)} + 1$$

$$FS_{C_D} = 2 \cdot e^{\left(\frac{depth_{i-appendix}}{chord_{i-appendix}} - 1.5\right)} + 1$$

I punti di applicazione delle forze idrodinamiche per i FOILS verticali variano in funzione della porzione di appendice immersa. È quindi necessario identificare un blocco che valuti le profondità di immersione delle appendici. Nel blocco vengono ruotate le componenti dal sistema Body solidale all'appendice sul sistema Earth, si identificano le aree delle appendici verticali emerse e sommerse ed infine per le componenti immerse viene identificata la coordinata lungo l'asse dell'appendice in cui applicare le forze fluidodinamiche. Contemporaneamente viene identificata la profondità dello scafo necessaria per la valutazione delle forze precedentemente definite.

3 Controllo

Per garantire la stabilità dell'imbarcazione è necessario implementare sofisticati sistemi di controllo che interagiscano con il sistema. I controllori progettati sfruttano il monitoraggio delle variabili di stato per controllare il comportamento stabile in ogni fase di navigazione, che si tratti del moto dislocante, del moto transitorio o del moto foilante [10] [11] [13] [14].

I FOILS orizzontali generano la portanza necessaria al sollevamento dell'imbarcazione, ed il sistema di controllo deve essere in grado di gestire l'azionamento dei flaps per regolare con precisione la quota di volo, l'assetto e la stabilità dinamica dell'imbarcazione, tenendo in considerazione le forze di disturbo dovute alle onde, al vento o forze di carico derivanti da disturbi esterni.

In questa applicazione si studiano approfonditamente le logiche di controllo PID e le logiche di controllo FUZZY per l'applicazione alla progettazione dei controllori ad anello chiuso. Lo schema a blocchi che definisce l'interazione tra i controllori sviluppati, il modello dinamico dell'imbarcazione e i disturbi esterni è rappresentato nella seguente figura:

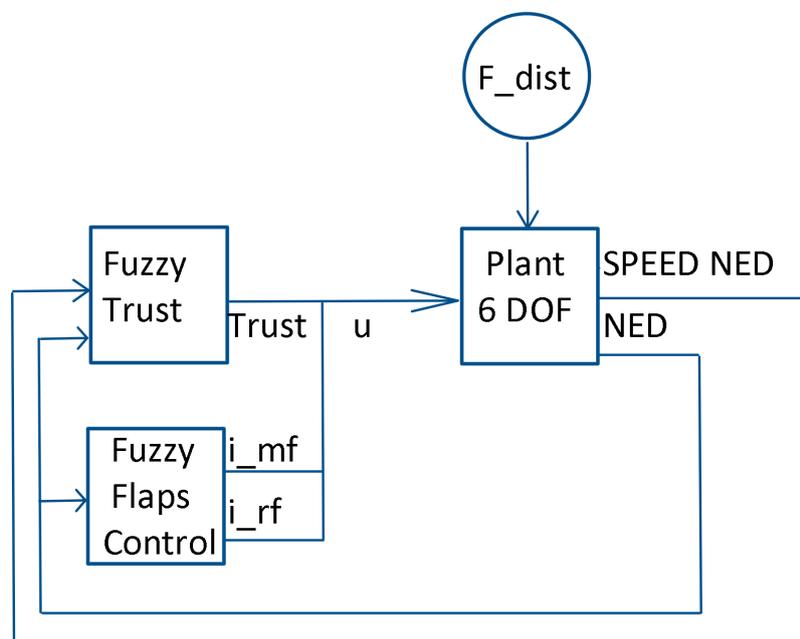


Figura 3.1 Schema a blocchi del sistema dinamico.

In analogia con le dinamiche di volo di un aeromobile, risulta chiaro che il compito del flaps relativo all'HYDROFOIL anteriore è quello di regolare il sollevamento grazie alla sua area maggiore che genera una forza di portanza superiore rispetto alla superficie alare posteriore [11] [13]. Mentre il beccheggio è controllato dall'azionamento del flap solidale al FOIL posteriore, sfruttando la maggiore distanza dal centro di massa che fornisce un braccio di leva maggiore. Il controllore per il rollio dell'imbarcazione è impostato sulle appendici anteriori con un movimento combinato stabilizzante.

La forza motrice dell'imbarcazione in esame è quella fornita dalle eliche motorizzate posizionate posteriormente ai FOILS di poppa. La potenza del motore dipende direttamente dall'input di comando fornito dal conducente, per il quale si possono ipotizzare differenti profili per rappresentare adeguatamente la condizione di alimentazione del motore. Si sono valutate varie rampe di alimentazione ed è stata sfruttata la logica FUZZY per costruire una superficie che identifica differenti profili di propulsione il più verosimile possibile, in funzione delle condizioni dinamiche dell'imbarcazione.

Un'importante considerazione sulla valutazione del profilo della forza propulsiva è la sua transizione graduale e controllata, per soddisfare sia i limiti costruttivi di funzionamento della motorizzazione sia gli obiettivi di controllo di stabilità dell'imbarcazione. La modellazione accurata della forza propulsiva è di fondamentale importanza per lo studio della stabilità dell'imbarcazione, poiché la gestione ottimale della potenza influisce direttamente sulle prestazioni, sulla reattività e sulla stabilità dinamica del sistema. Non considerare un'adeguata modellazione o regolazione di questa forza può compromettere l'intera strategia di controllo e conseguentemente la sicurezza e l'efficienza operativa dell'imbarcazione.

3.1 Logica di Controllo PID

Una delle strategie di controllo più diffusa per la regolazione dell'assetto e della quota di volo di un'imbarcazione foilante, è l'implementazione dei controllori ad anello chiuso PID (Proporzionale-Integrativo-Derivativo) [13] [15]. Un sistema di controllo ad anello chiuso ha una retroazione delle variabili misurate in uscita che agisce sull'ingresso del controllore. In questo modo il controllo rileva le variazioni dei valori delle variabili misurate ed interviene con una compensazione.

Lo schema a blocchi identifica un generico processo controllato in retroazione, in cui l'effetto dei disturbi è rappresentato in Figura 3.2, in cui si identificano anche i blocchi C per il controllore e P per il processo:

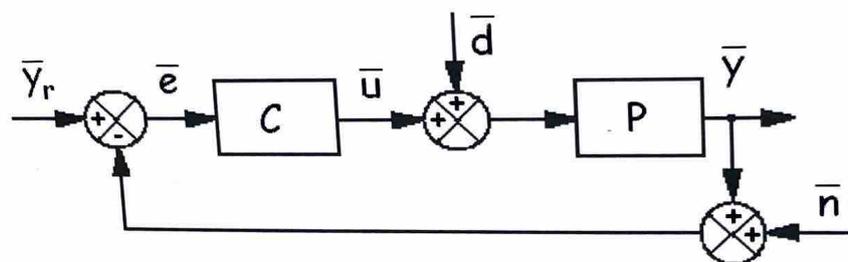


Figura 3.2 Schema a blocchi di un controllore ad anello chiuso [15].

Le variabili dello schema a blocchi sono:

- y variabile di processo o variabile misurata;
- y_r variabile di riferimento;
- d variabile di disturbo;
- u variabile di controllo;
- e errore tra la variabile di riferimento e variabile di processo;
- n variabile del disturbo del sensore.

Il controllore vede in ingresso l'errore espresso come differenza tra le variabili di riferimento e di processo. Si suppone di trascurare il disturbo n del sensore. Si definisce guadagno statico del processo il termine k_p definito come:

$$k_p = \frac{1}{P}$$

Si puo scrivere la relazione per la variabile di processo per il sistema ad anello chiuso come:

$$y = k_p P (y_r - y) + P d$$

Da cui si ottiene l'espressione della variabile misurata in funzione della variabile di riferimento e del disturbo con la formula:

$$y = \frac{k_p P}{1 + k_p P} y_r + \frac{P}{1 + k_p P} d$$

Considerando la variabile di disturbo $d = 0$ l'errore di controllo è espresso come:

$$e = y_r - y = \frac{1}{1 + k_p P} y_r$$

Mentre l'errore relativo è espresso da:

$$e_r = \frac{e}{y_r} \cdot 100\% = \frac{1}{1 + k_p P} \cdot 100\%$$

Si osserva che per $k_p \gg 1$ si osserva che $y \cong y_r$ ed $e \cong 0$.

In presenza di disturbo se $k_p \gg 1$ il disturbo influisce poco sulla variabile di processo, come si osserva nella formula dell'errore relativo che risulta essere:

$$e_r = \left(\frac{1}{1 + k_p P} - \frac{P}{1 + k_p P} \frac{d}{y_r} \right) \cdot 100\%$$

Nel caso in cui il guadagno k_p sia abbastanza elevato, un sistema ad anello chiuso risulta poco sensibile ai disturbi esterni e alla variazione di parametri del processo. Un eccessivo aumento di k_p provoca instabilità poiché peggiorano le caratteristiche dinamiche del sistema controllato. Per evitare questi problemi si fa la taratura dei parametri dei controllori [15].

La stabilità, la precisione e la velocità di risposta del controllo sono requisiti principali per la valutazione di un sistema di controllo. La Figura 3.3 si mostra il transitorio, in seguito ad una perturbazione a gradino, della variabile controllata.

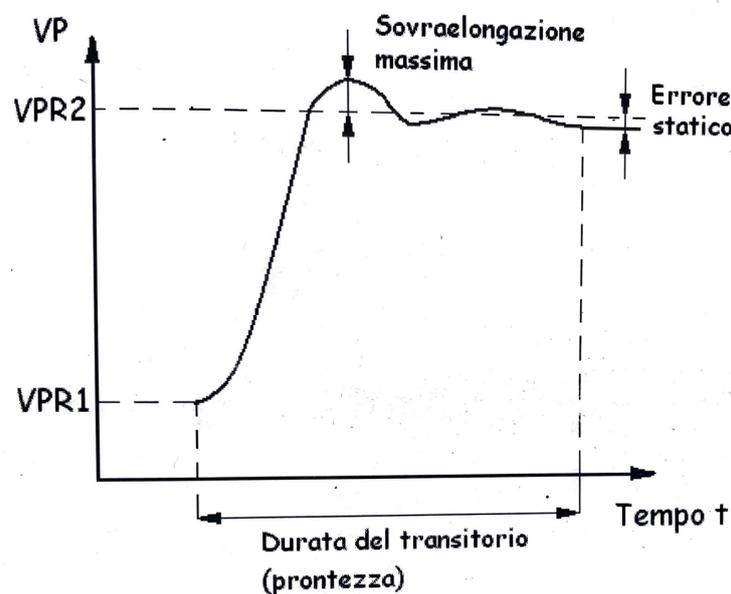


Figura 3.3 Risposta a gradino di un sistema controllato [15].

Un processo si dice asintoticamente stabile quanto più la variabile di processo si avvicina al valore della variabile di riferimento. Più un sistema è stabile, più la risposta presenta oscillazioni meno pronunciate, e quindi la perturbazione in ingresso è più smorzata.

L'errore statico è la differenza tra il valore desiderato e quello della variabile di processo desiderata a regime, mentre la sovra elongazione, che definisce la precisione dinamica, è la differenza tra il valore desiderato e il picco della risposta del sistema durante il transitorio.

Vengono definiti due parametri temporali:

- Il tempo di salita: tempo necessario affinché la variabile in uscita aumenti dal 10% al 90% del valore finale.
- Il tempo di assestamento: identificato quando la variabile si stabilizza intorno al valore desiderato finale.

Il processo transitorio ideale ha una durata del transitorio breve, una sovra elongazione ridotta e l'errore statico trascurabile.

Il controllo PID, proporzionale integrale derivativo, è uno dei metodi di controllo più utilizzati [15], grazie alle semplici leggi di controllo e ai pochi parametri di taratura empirici che permettono di controllare il sistema.

I tre contributi di regolazione che costituiscono il controllore PID sono:

- Proporzionale;
- Integrale;
- Derivativo.

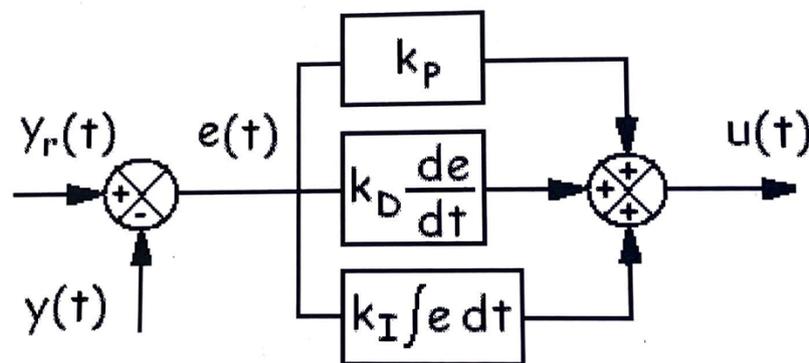


Figura 3.4 Schema di base del controllore PID nel tempo [15].

I termini k_p , k_i , k_d sono rispettivamente il guadagno proporzionale, il guadagno integrale ed il guadagno derivativo. Il valore della costante di tempo derivativa T_d rappresenta il tempo necessario affinché l'azione proporzionale uguagli l'azione derivativa, nel caso in cui l'errore aumenti linearmente nel tempo a partire dal valore zero [15]. La costante di tempo integrale T_i rappresenta il tempo necessario affinché l'azione integrale uguagli l'azione proporzionale nel caso in cui l'errore sia pari ad una costante nel tempo [15]. Le costanti di tempo integrale e derivativa T_i e T_d :

$$T_i = \frac{k_p}{k_i}$$

$$T_d = \frac{k_d}{k_p}$$

La legge di controllo del sistema PID, nel dominio del tempo, è definita con la legge di controllo $u(t)$ calcolata rispetto all'ingresso $y(t)$:

$$u(t) = k_p \cdot \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^1 e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right]$$

L'azione del guadagno proporzionale permette di ridurre l'errore statico ed il tempo di salita, ma valori troppo elevati riducono i margini di stabilità. L'azione integrale riduce l'errore a regime tanto più è grande il guadagno, ma questo ne aumenta l'instabilità. L'azione derivativa invece permette di aumentare la stabilità del sistema diminuendo la sovra elongazione ed il transitorio.

La taratura manuale del controllore prevede l'identificazione dei guadagni per tentativi, in modo da ottenere un controllo soddisfacente del processo, ma tale processo richiede molto tempo. In letteratura sono stati definiti dei metodi di taratura automatica dei parametri con lo scopo di velocizzare i tempi di messa a punto del controllore e di affinare il controllo del processo.

Il metodo Ziegler-Nichols in anello chiuso [15], è stato sfruttato per la valutazione dei guadagni, perturbando il sistema attraverso l'imposizione di un disturbo a gradino della variabile di ingresso, e adattando i parametri in base alla risposta del sistema ottenuta.

Il metodo si basa sulla seguente procedura [15]:

- Si impostano pari a zero i coefficienti k_p , k_i , k_d .
- Si aumenta gradualmente il valore del coefficiente proporzionale k_p finché la risposta del sistema al disturbo a gradino comporta un'oscillazione permanente della variabile di uscita.
- In tali condizioni di limite di instabilità, si registrano il guadagno proporzionale k_{p0} ed il periodo delle oscillazioni T_0 .
- Sfruttando la tabella di taratura di Ziegler-Nichols, in Figura 3.5, si ricavano i parametri dei controllori k_p, T_i, T_d .

	k_p	T_i	T_d
P	$0.5 k_{p0}$	-	-
PI	$0.45 k_{p0}$	$T_0/1.2$	-
PID	$0.6 k_{p0}$	$T_0/2$	$T_0/8$

Figura 3.5 Formule per il calcolo dei parametri del controllo PID [15].

Notoriamente in analogia con gli aeromobili, le appendici portanti si dividono i ruoli di sollevamento e assetto [10] [13]. Le appendici anteriori regolano in sollevamento grazie alla loro area maggiore che genera una forza di portanza superiore rispetto alle appendici posteriori. Il beccheggio è controllato dalla appendice portante posteriore, in quanto si sfruttano la maggiore distanza dal centro di massa e quindi un braccio di leva maggiore per controllare l'assetto. Il controllo dei flaps posti sulle appendici portanti viene gestito dai controllori di volo. Questi registrano le condizioni di volo e grazie all'attuazione dei flaps permettono di modificare l'angolo di incidenza delle appendici, perseguendo gli obiettivi di controllo.

Per l'applicazione sviluppata in questo progetto, l'architettura dei controllori di volo per il moto longitudinale è costituita da due controllori PID con logica SISO, i quali si dividono i compiti di gestione della quota e del beccheggio [10] [13].

Per il controllo dell'imbarcazione nei sei gradi di libertà è stato implementato un terzo controllore PID che regola il rollio dell'imbarcazione e attua sulle appendici anteriori un movimento combinato stabilizzante. Nell'oggetto di studio, non è stato implementato il controllo della rotta, quindi mancano ulteriori controlli che gestiscano l'imbardata.

Il controllore PID è stato scelto per la sua semplicità di implementazione in quanto controllore ad ingresso singolo e uscita singola. Tuttavia, la regolazione ottimale dei parametri di un controllore PID può risultare complessa e i parametri non sono scalabili. Il controllore PID è impostato nel dominio del tempo continuo, sfruttando la legge di controllo in funzione dei contributi P, I e D ottenuti tramite differenti test di taratura attraverso il metodo Ziegler-Nicols.

In Figura 3.6 si presenta lo schema a blocchi definito in ambiente Simulink per il controllore PID assegnato al controllo dei flaps relativi ai FOILS delle appendici anteriori. L'obiettivo di tale controllore è il raggiungimento della quota target di regime.

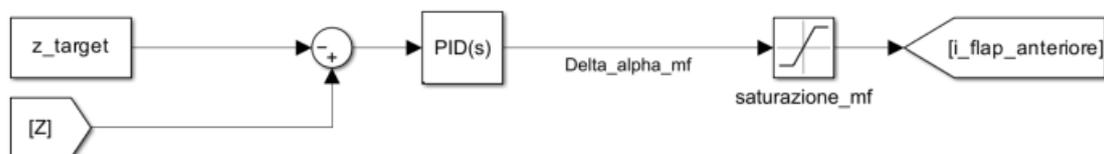


Figura 3.6 Schema a blocchi del controllore PID per controllo della quota.

In Figura 3.7 si presenta lo schema a blocchi definito in ambiente Simulink per il controllore PID assegnato al controllo del flap relativo al FOIL dell'appendice posteriore. L'obiettivo di tale controllore è il mantenimento dell'angolo di beccheggio al valore target in ogni condizione di navigazione.

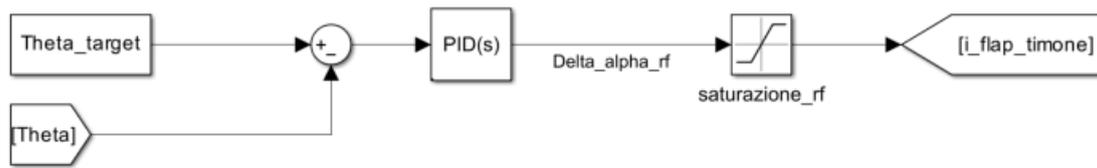


Figura 3.7 Schema a blocchi del controllore PID per controllo dell'assetto.

L'equazione di controllo su cui si basa il blocco Simulink del controllore PID è espressa dalla formula:

$$u(x) = P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}}$$

Per i controllori PID viene impostato un valore in ingresso corrispondente all'errore rispetto all'obiettivo target da raggiungere. Poiché il beccheggio e il sollevamento sono controllati separatamente dai rispettivi regolatori non si influenzano reciprocamente.

Il primo controllore persegue l'obiettivo del raggiungimento della quota di volo target in condizione di regime, per cui il controllore PID vede in ingresso l'errore e_1 pari a:

$$e_1 = z - z_{target}$$

Il secondo controllore persegue l'obiettivo di mantenere l'assetto dell'imbarcazione neutro. All'ingresso del controllore è impostato il valore e_2 pari alla differenza tra la variabile θ misurata e il valore θ target pari a zero:

$$e_2 = \theta - \theta_{target}$$

Gli output del controllore esprimono l'azionamento dei flaps introducendo un contributo di variazione dell'angolo di attacco del foil. Tali valori entrano direttamente nel blocco di valutazione dell'incidenza dei FOILS contribuendo alla valutazione dell'angolo di attacco del HYDROFOIL, e quindi alla determinazione dei coefficienti di portanza e resistenza dell'appendice.

Vengono identificati i coefficienti ottimali k_p , k_i , k_d per ogni controllore tramite tentativi iterativi e apportando correzioni in base al comportamento dopo ogni modifica.

Inoltre, è stata implementata una saturazione del segnale in uscita entro valori di angoli massimi e minimi per evitare che il controllore eccedesse in regolazioni che superassero i limiti costruttivi di regolazione degli angoli delle appendici, ed evitare le regioni di stallo dei foil. Osserviamo i seguenti intervalli di saturazione di regolazione di intervallo pari a:

$$I_{sat_flap_anteriori} = [-20, +20]$$

$$I_{sat_flap_timone} = [-15, +20]$$

La regolazione simultanea del beccheggio e del sollevamento risulta instabile e con comportamento oscillatorio data la natura fortemente non lineare del sistema.

Il principale limite dei controllori PID è la linearità del controllo. Nel caso di processi non lineari, come quello in esame, è possibile far operare il controllore nell'intorno di un determinato punto di funzionamento, considerando il sistema come localmente lineare.

In metodo di *gain scheduling* è uno tra i più semplici metodi di controlli adattivi. Esso permette di tarare controllori lineari modificando i parametri in sezioni del sistema considerabili localmente lineari, in questo modo è possibile trattare sistemi non lineari complessi.

Quindi, per il sistema in esame, sarebbe possibile creare un *gain scheduling* del controllore che permetta la migrazione dei parametri PID dalla condizione di regime dislocante alla condizione di regime foilante.

Il risultato finale indentificato è stato tarare i controllori PID per il moto longitudinale in una condizione di ottimo che permette di garantire una condizione di volo stabile della barca mitigando le oscillazioni iniziali relative alla fase di transizione da regime dislocante a foilante.

3.2 Logica controllo FUZZY

I sistemi di controllo FUZZY sono utilizzati in diversi settori ed il vantaggio principale dell'utilizzo di questa tecnica è la sua applicazione a sistemi complessi non lineari, per i quali risulta difficile la modellazione analitica [14] [15].

Tale logica permette la formulazione delle regole di controllo anche sulla base dell'esperienza dell'operatore che sfruttando una logica linguistica che può ottimizzare le performance desiderate.

I principali vantaggi del controllo FUZZY [15] sono:

- l'esperienza degli esperti si integra nel sistema facilmente in maniera intuitiva;
- si possono controllare sistemi complessi e non lineari;
- non è necessario un modello matematico delle leggi di controllo;
- il controllo è adattabile ad eventuali modifiche del sistema controllato;
- il controllo FUZZY può essere associato ad altre tecniche di controllo;
- l'algoritmo di calcolo è semplice ed economico.

Gli svantaggi del controllo FUZZY [15] sono:

- necessario tuning dei parametri dei controllori che può richiedere una modifica del numero di classi di appartenenza, della forma delle funzioni di appartenenza, delle regole di interferenza e del metodo di *defuzzificazione*;
- la metodologia di progetto non è rigorosa e non garantisce risultati ottimali, che vanno opportunamente ricercati come obiettivi di progettazione del controllore.

3.2.1 Principi logica FUZZY

La logica FUZZY è una teoria logico-matematica che sviluppa il concetto “logica sfumata” [15] [16]. La tradizionale logica binaria associa ad un'asserzione due possibili stati, la verità legata al valore numerico 1, o la falsità, associata al valore numerico 0.

La logica sfumata FUZZY associa al medesimo enunciato, identificato da una o un gruppo di funzione dette “funzioni di appartenenza”. Ad esse è associato un grado di appartenenza, compreso tra 0 e 1, definito in funzione della variabile misurata.

Lo schema di un controllore FUZZY presenta da tre moduli principali [15]:

- Modulo di *fuzzificazione*;
- Modulo di applicazione delle regole;
- Modulo di *defuzzificazione*.

Le variabili in ingresso e in uscita sono valori numerici, mentre il regolatore su variabili definite di tipo FUZZY. Le variabili FUZZY identificano gli ingressi e le uscite secondo una formulazione strutturale e non numerica. Si utilizzano delle interfacce dette di *Fuzzificazione* e *Defuzzificazione*, che consentono di trasformare i valori numerici di ingressi e uscite nella loro rappresentazione FUZZY all'interno dell'algoritmo, convertendo i valori numerici in ingresso e restituendo i valori numerici alle uscite.

La parte centrale dello schema in Figura 3.8, elabora le rappresentazioni degli ingressi nelle rappresentazioni delle uscite, secondo l'imposizione delle *regole di interferenza* della logica FUZZY.

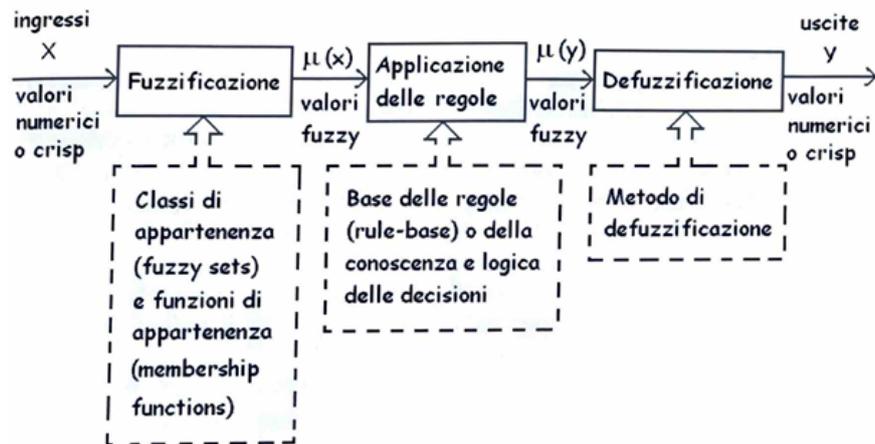


Figura 3.8 Schema tipico di un controllore FUZZY [15].

Modulo di fuzzificazione

Si identifica un campo di valutazione della variabile di ingresso all'interno del quale è possibile creare una o più classi di appartenenza che descrivono l'evoluzione della stessa entro i limiti del campo in cui è definita. Ogni classe di appartenenza è descritta da una funzione di appartenenza. Tale funzione, come mostrato nella figura sottostante, può assumere diverse forme: triangolari, trapezoidali lineari a tratti o gaussiane.

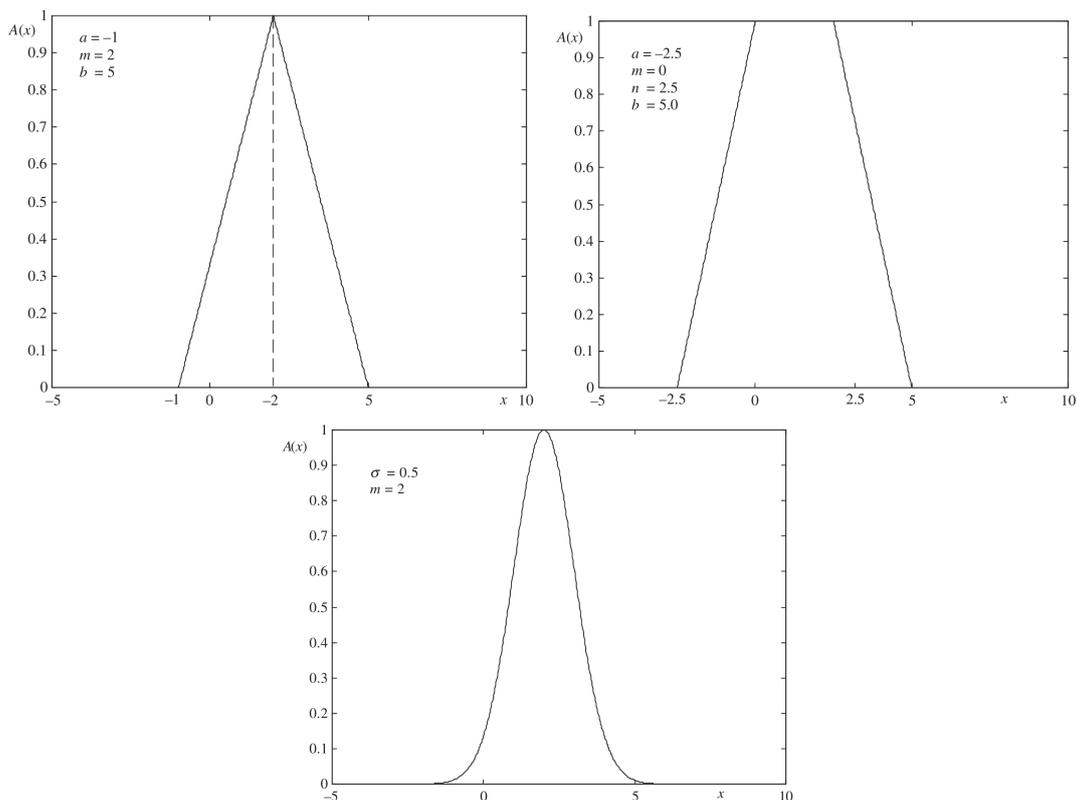


Figura 3.9 Forme delle funzioni di appartenenza [16].

L'insieme delle classi di appartenenza si definisce *FUZZY set*. Il valore della variabile in ingresso viene *fuzzificato* associando un grado di attivazione ad ogni funzione di appartenenza del set di funzioni di appartenenza definite nell'intervallo. Pertanto, per ogni valore che la variabile può assumere nel campo di variazione si può definire un grado di appartenenza per ciascuna classe, anche se nullo. In figura si osserva un esempio [15], in cui la variabile P in ingresso con valore 4 attiva le tre classi del FUZZY set, identificandone i tre gradi di attivazione.

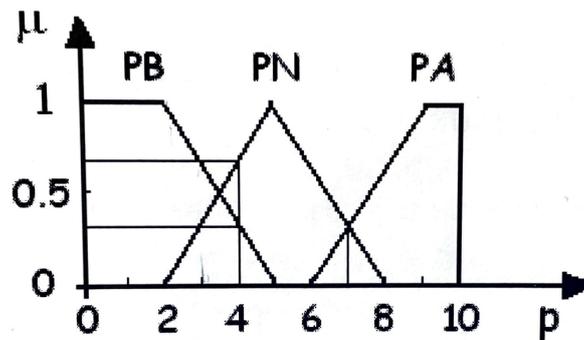


Figura 3.10 Esempio di *fuzzificazione* [15].

Per le funzioni di appartenenza trapezoidali si possono facilmente individuare: il *nucleo*, detto *core*, in cui il grado di attivazione è pari ad uno; il *supporto* definito per valori il cui grado di attivazione diminuisce fino a zero. Si definisce anche α - *cut*, la porzione del *fuzzy set* a cui corrisponde un grado di attivazione $\geq \alpha$.

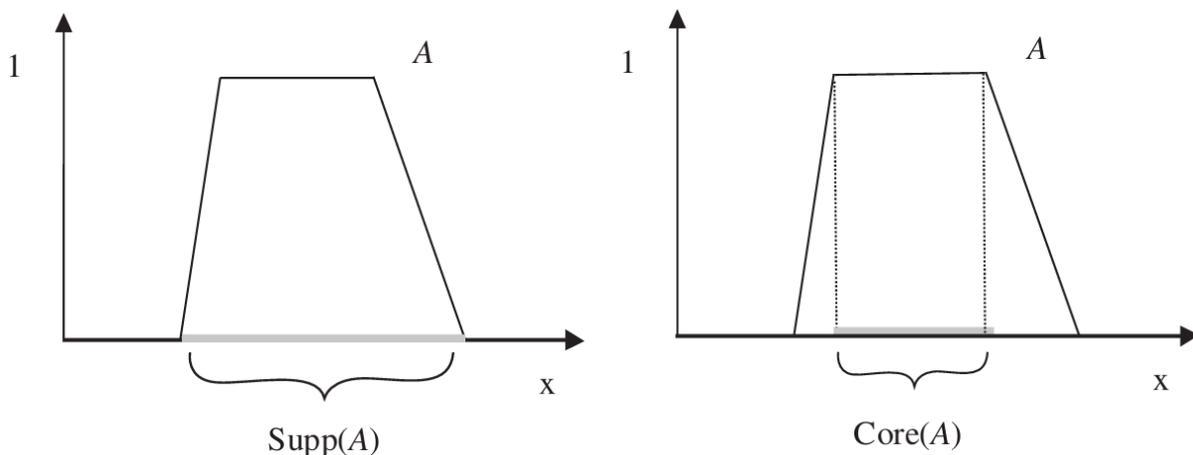


Figura 3.11 Definizione del nucleo del supporto [16].

In formule:

$$\text{core}(A) = \{x: \mu_A(x) = 1\}$$

$$\text{support}(A) = \{x: \mu_A(x) > 0\}$$

$$\alpha - \text{cut}(A) = \{x: \mu_A(x) \geq \alpha\}$$

La specificità di funzioni di appartenenza trapezoidali è legata alla dimensione del nucleo mentre la precisione è legata alla pendenza delle funzioni nei tratti esterni al nucleo. Nella figura seguente si confrontano tre funzioni di appartenenza e si può affermare che il *fuzzy set* B è più specifico del *fuzzy set* A mentre il *fuzzy set* C è più preciso del *fuzzy set* A.

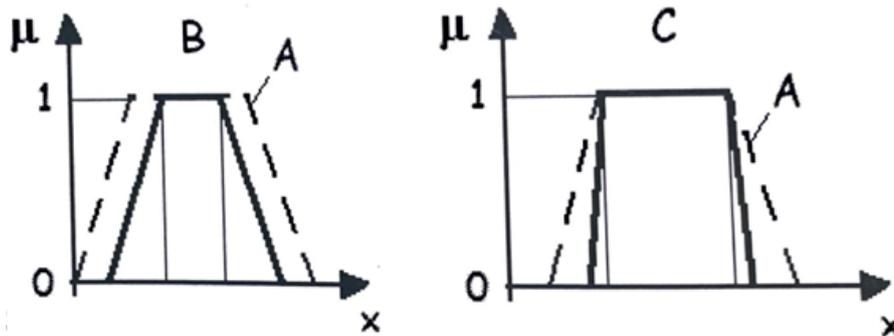


Figura 3.12 Confronto specificità precisione tra *fuzzy set* A, *fuzzy set* B, *fuzzy set* C [15].

Si possono definire alcune operazioni fra gli insiemi FUZZY come estensione delle operazioni della logica booleana tradizionale. In figura sono rappresentate le operazioni di somma o unione (OR), le operazioni di prodotto o intersezione (AND), e l'operazione di negazione (NOT).

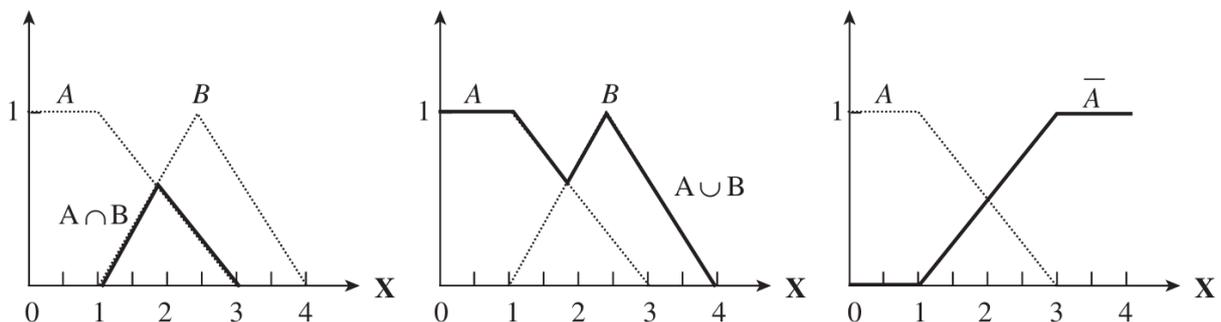


Figura 3.13 Operazioni base logica booleana applicate in sistema FUZZY [16].

$$\mu_{A+B}(x) = \max(\mu_A, \mu_B)$$

$$\mu_{A \cdot B}(x) = \min(\mu_A, \mu_B)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Modulo di applicazione delle regole

La progettazione delle regole su cui si basa l'algoritmo viene determinata in base ad una classificazione linguistica. Il numero delle regole corrisponde al numero di tutte le combinazioni possibili delle classi di appartenenza definite per gli ingressi, ma possono essere aggiunte ulteriori regole che sfruttano le operazioni tra le classi viste in precedenza. Le regole possono anche essere ricavate sulla base dell'esperienza.

Per esprimere la classificazione linguistica delle regole si definiscono:

- due variabili di ingresso, A e B;
- n classi di appartenenza delle variabili di ingresso, A_i, B_j ;
- una variabile di uscita U;
- n classi di appartenenza della variabile di uscita U_k .

Allora la codifica delle regole è espressa come:

"IF A IS A_i AND B IS B_j THEN "U IS U_k "

L'algoritmo analizza tutte le combinazioni fra gli ingressi. Le regole codificate dall'algoritmo identificano il valore dell'uscita sulla base degli ingressi.

Il metodo più diffuso di applicazione delle regole è il metodo Mamdani che prevede l'evoluzione delle regole e l'aggregazione dei risultati delle regole [15]. In questo modo risulta abbastanza intuitivo come l'uscita del regolatore dipenda dal valore istantaneo degli ingressi. Una sintesi dalla matrice delle regole è data dalla matrice di Macvicar-Whelan, dove si identificano le classi di interferenza attivate delle uscite in funzione della combinazione delle classi di interferenza degli ingressi [15].

<i>u</i>		<i>e</i>				
		NG	N	Z	P	PG
<i>e</i>	NG	NG	NG	NG	N	Z
	N	NG	NG	N	Z	P
	Z	NG	N	Z	P	PG
	P	N	Z	P	PG	PG
	PG	Z	P	PG	PG	PG

Figura 3.14 Esempio matrice di regole metodo Mamdani [15].

Bisogna considerare tutte le combinazioni possibili degli ingressi definite dalla matrice delle regole per calcolare il grado di attivazione delle classi dell'uscita ed il relativo grado di attivazione, ed applicare le *operazioni di interferenza*.

Per un valore misurato delle variabili in ingresso si identificare il grado di attivazione delle classi per ogni funzione di interferenza.

$$\forall A \exists \{ \forall i: \mu_{A_i}(A) = (\text{grado di attivazione})_{A_i} \}$$

$$\forall B \exists \{ \forall j: \mu_{B_j}(B) = (\text{grado di attivazione})_{B_j} \}$$

Bisogna eseguire le seguenti operazioni per ottenere il grado di attivazione di ciascuna classe della variabile di uscita. La prima operazione è quella di *intersezione di insiemi FUZZY* che, come nella seguente formula, identifica il valore minimo tra i gradi di attivazione delle funzioni di appartenenza degli ingressi, da cui si ottiene il valore delle premesse μ_p , dove i e j sono le classi di appartenenza degli ingressi:

$$\mu_p(A_i, B_j) = \min[\mu_i(A), \mu_j(B_j)]$$

La seconda operazione di *unione di insiemi FUZZY* calcola il massimo del grado di attivazione di ogni classe dell'uscita. La classe di appartenenza dell'uscita è k, e i e j individuano le premesse relative alla classe secondo la matrice delle regole:

$$\mu(u_k) = \max(\mu_p(A_i, B_j)) = \max[\min(\mu_i(A), \mu_j(B_j))]$$

Si ottiene che i gradi di attivazione delle classi di appartenenza degli ingressi ed il risultato delle operazioni di interferenza assegnano il grado di attivazione delle funzioni di appartenenza delle premesse dell'uscita.

A questo punto attraverso l'*operazione di aggregazione delle funzioni di appartenenza dell'uscita scalate per il relativo grado di attivazione*, si ottiene il *fuzzy set* della variabile di uscita derivante dalla combinazione delle regole per i valori delle variabili in ingresso misurati.

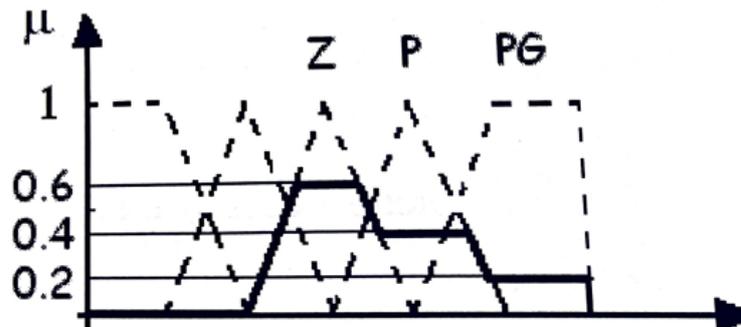


Figura 3.15 Rappresentazione del *fuzzy set* di uscita [15].

Modulo di defuzzificazione

L'operazione di *defuzzificazione* avviene attraverso il *metodo del centro di massa* che converte il *fuzzy set* di uscita in un valore numerico mediante la formula seguente:

$$U = \frac{\sum_i u_i \mu(u_i)}{\sum_i \mu(u_i)}$$

È possibile ottenere una rappresentazione grafica del legame fra gli ingressi e le uscite grazie alla funzione chiamata “superficie di controllo”.

Questa superficie di controllo è definita in uno spazio tridimensionale e rappresenta la combinazione delle variabili di ingresso fornendo i valori delle variabili di controllo delle uscite. Può essere modellata variando le forme delle funzioni di appartenenza degli ingressi e delle uscite, l'applicazione delle regole e i metodi di elaborazione dell'algoritmo.

Poter intervenire su questa superficie di controllo permette di gestire le relazioni complesse, non lineari tra gli input e gli output ottenendo una rappresentazione difficilmente ottenibile mediante metodi tradizionali che sfruttano funzioni di controllo definite algebricamente. Infatti, uno dei vantaggi principali dei sistemi di controllo FUZZY è poter controllare sistemi complessi non lineari per i quali è difficile una modellazione analitica.

3.2.2 Applicazione logica FUZZY per controllo assetto-quota

L'applicazione della logica FUZZY può migliorare le prestazioni dell'imbarcazione e la sua stabilità in condizioni di mare avverso rispetto ai tradizionali controllori PID.

La progettazione del controllore di assetto tramite logica FUZZY segue l'impostazione del problema osservato in letteratura [14] in cui si progetta un controller FUZZY per il controllo di volo di un aliscafo con FOILS a T.

Le variabili di input del controllore sono l'angolo di beccheggio e il movimento verticale che indica la variazione di quota dell'imbarcazione. Gli output identificano gli azionamenti dei flaps delle appendici di timone e derive, che variano l'angolo di attacco dell'appendice, influenzando direttamente sulla valutazione dei coefficienti idrodinamici di portanza e resistenza.

Questo lavoro amplia la progettazione del controllore, non solo nell'intorno di una condizione di equilibrio per una certa velocità nel regime di volo, ma gestisce tutta la fase di controllo della stabilità dell'imbarcazione dalla condizione di partenza a barca ferma alle condizioni di moto foilanti al regime di navigazione. Questo transitorio di fatto è uno dei punti più critici del sistema analizzato anche nella progettazione dei controllori PID, in quanto nel passare da regime dislocante a foilante si ha un complesso bilancio tra gli equilibri di forze idrodinamiche legate all'attrito dello scafo, la forza propulsiva e le forze di portanza e resistenza delle appendici. Il controllore FUZZY permette la progettazione di una superficie di controllo output ottimale per ogni condizione di moto dell'imbarcazione.

Gli ingressi del controllore FUZZY progettato sono due, angolo Theta θ e Quota Z. Per ciascuno viene definito un dominio di progettazione FUZZY che rappresenta i range variazionali massimi delle variabili. Per ogni ingresso viene definito un *fuzzy set* che contiene le classi di appartenenza. La funzione di appartenenza determina che ogni valore nel dominio può essere descritto dalla quantità FUZZY e dal grado di appartenenza.

La *fuzzificazione* è l'interfaccia di input del controllore, essa converte le variabili di input in funzioni *fuzzificate*, classi di appartenenza che codificano la lettura del valore numerico di ingresso in un algoritmo FUZZY nel dominio fondamentale.

$$\theta \in (-1,5; 1,5)$$

$$Z \in (-1,6; 0,5)$$

$$\theta = \{NB, NM, ZO, PM, PB\}$$

$$Z = \{D0, D1, MB, NM, ZO, PM, PB\}$$

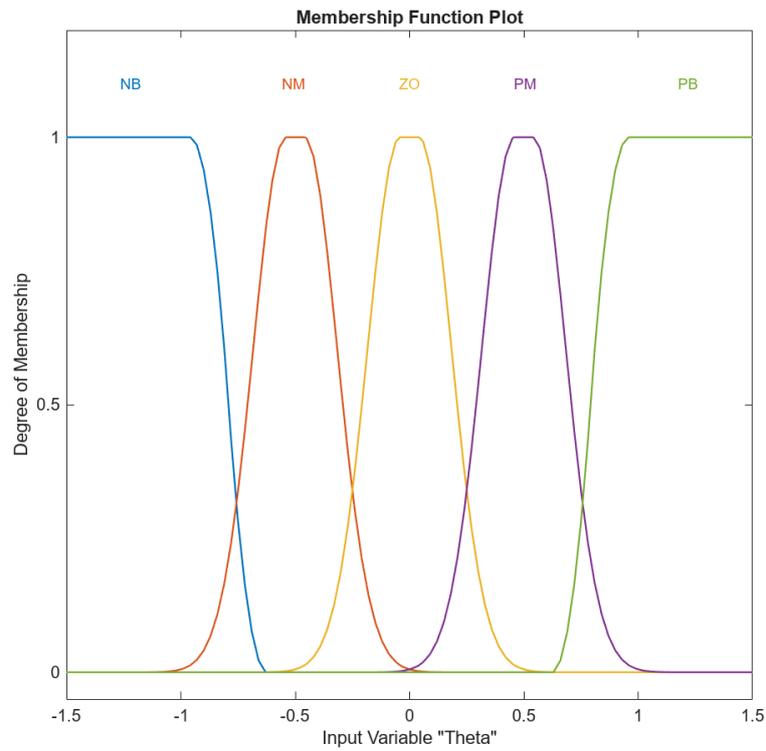


Figura 3.16 Classi di appartenenza della variabile in input Theta.

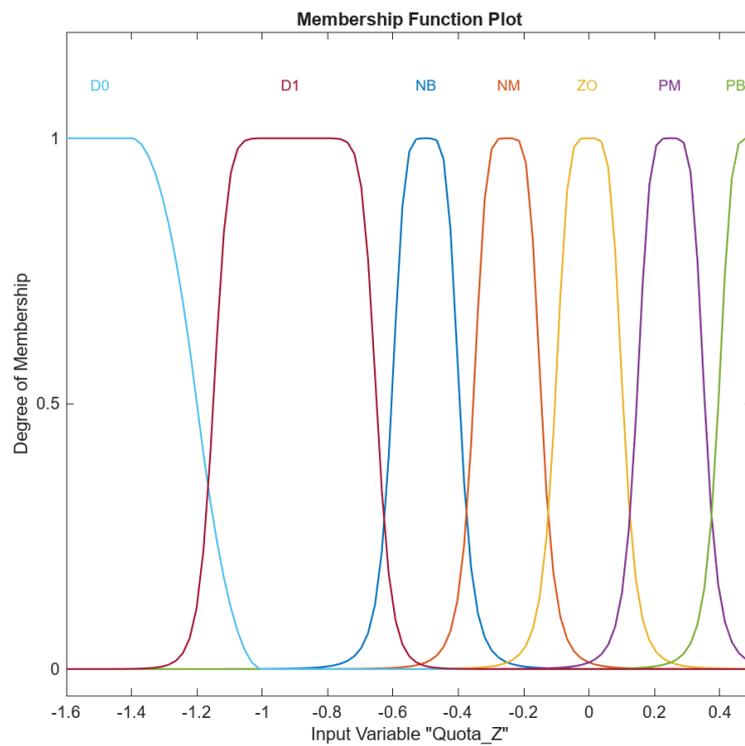


Figura 3.17 Classi di appartenenza della variabile in input Quota.

Analogamente si definiscono i *fuzzy set* per le due uscite del controllore, che sono relative agli azionamenti dei flaps delle appendici anteriore e di quella posteriore, anch'essi definiti in un dominio che rappresenta l'ampiezza di regolazione del flap.

$$U1 \in (-15; 15)$$

$$U2 \in (-5; 15)$$

$$U1 = \{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

$$U2 = \{NS, ZO, PS, PM, PB\}$$

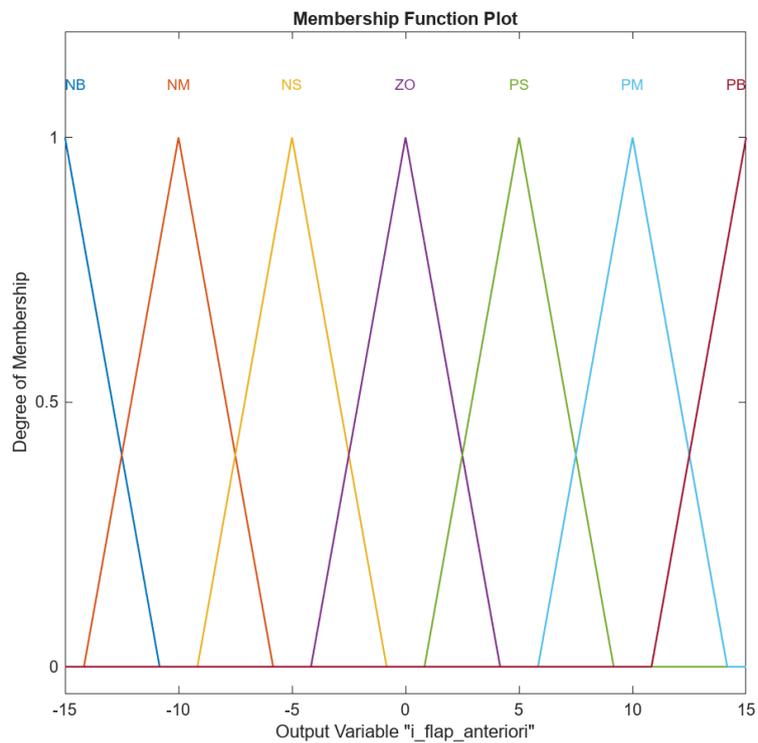


Figura 3.18 Classi di appartenenza della variabile in output controllo flaps anteriori.

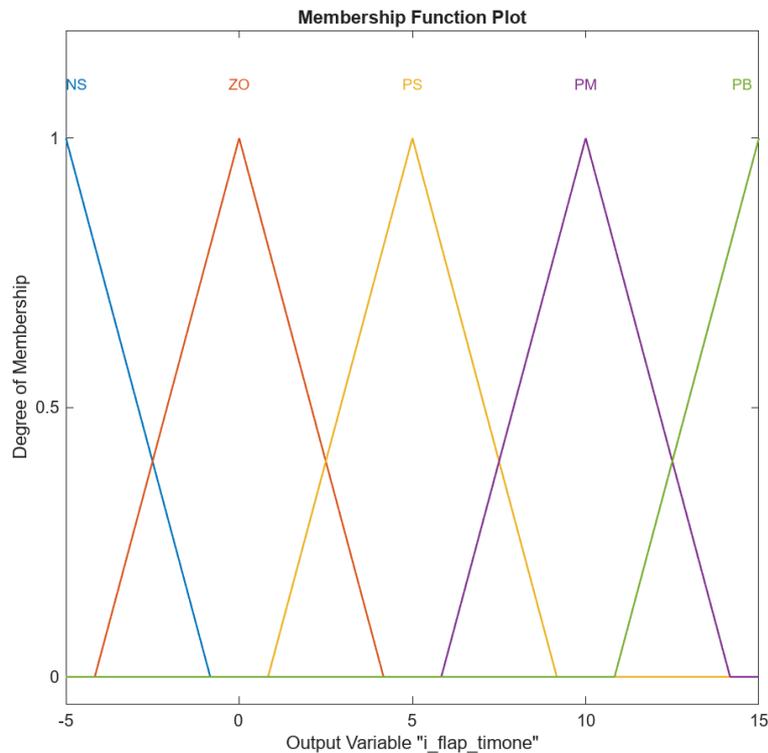


Figura 3.19 Classi di appartenenza della variabile in output controllo flaps posteriore.

Il numero delle regole corrisponde a tutte le combinazioni possibili delle classi di appartenenza degli ingressi. Avendo sviluppato un sistema FUZZY con due ingressi e due uscite, le regole implementate sono 35 per ogni uscita.

Una sintesi dalla matrice delle regole è data dalla matrice di Macvicar-Whelan, in cui alle classi degli ingressi vengono associate le classi dell'uscita. Vediamo nella tabella 3.1, la matrice di regole sviluppata per l'attuazione dei flaps delle appendici anteriori e successivamente la superficie di controllo ad essa relativa in Figura 3.20.

$\theta \backslash Z$	D0	D1	NB	NM	Z0	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PM	ZO	NS
NM	PM	PB	PM	PM	PS	NS	NS
Z0	PM	PM	PS	PS	ZO	NS	NS
PM	PM	PM	PS	PS	NS	NM	NM
PB	ZO	ZO	PS	PS	NM	NM	NB

Tabella 3.1 Regole di controllo per l'attuazione per i flaps anteriori.

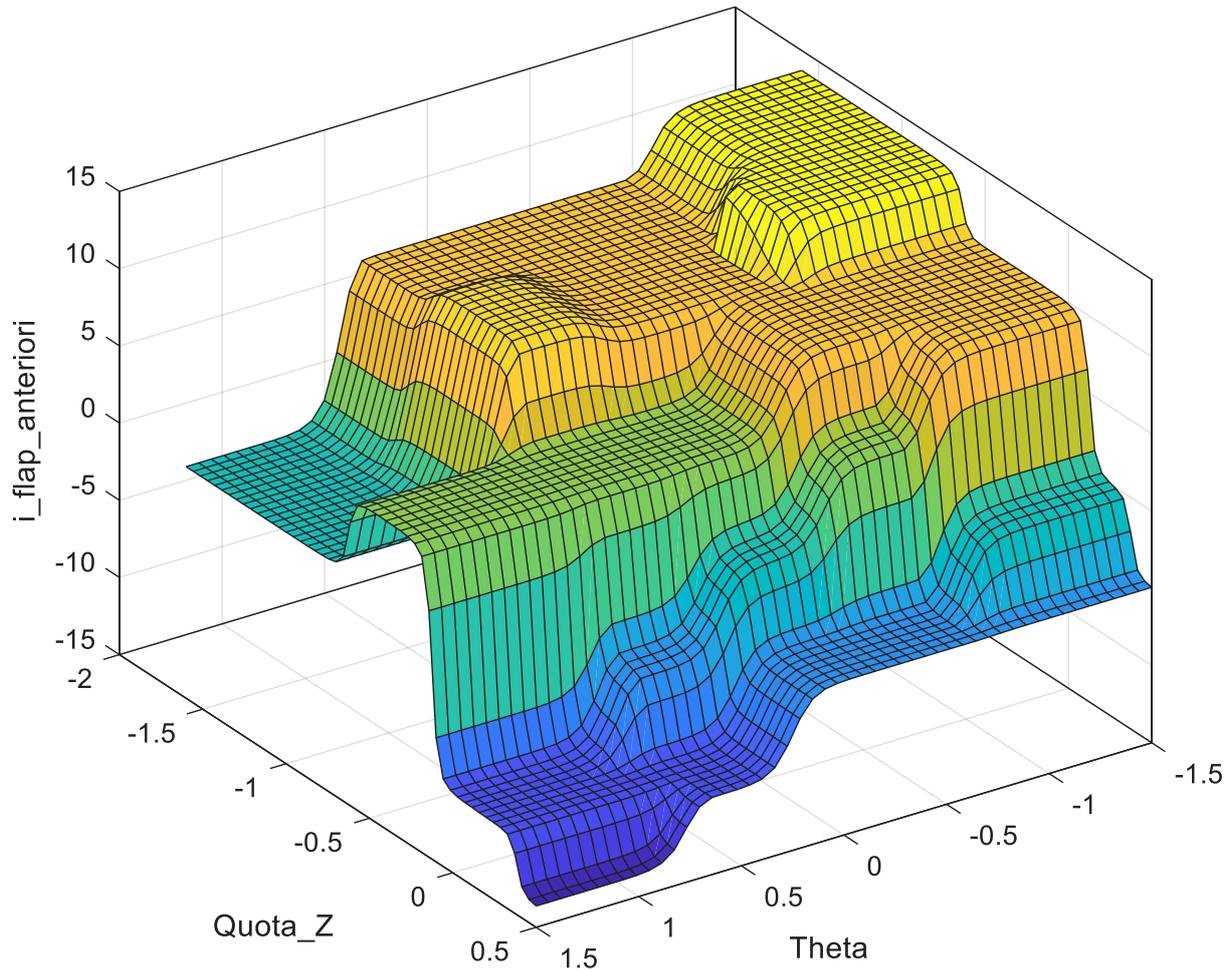


Figura 3.20 Superficie di controllo per attuazione flaps anteriori.

Nella Tabella 3.2 è riportata la matrice delle regole sviluppata per l'attuazione del flap del timone e in seguito la superficie di controllo ad essa associata, in Figura 3.21.

$\theta \backslash Z$	D0	D1	NB	NM	Z0	PM	PB
NB	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	PS
NM	PS	ZO	ZO	ZO	ZO	PS	PS
Z0	PS	PS	PS	PS	ZO	PS	PS
PM	PM	PM	PS	PS	PS	PM	PM
PB	PM	PB	PM	PM	PM	PM	PB

Tabella 3.2 Regole di controllo per l'attuazione per il flap posteriore.

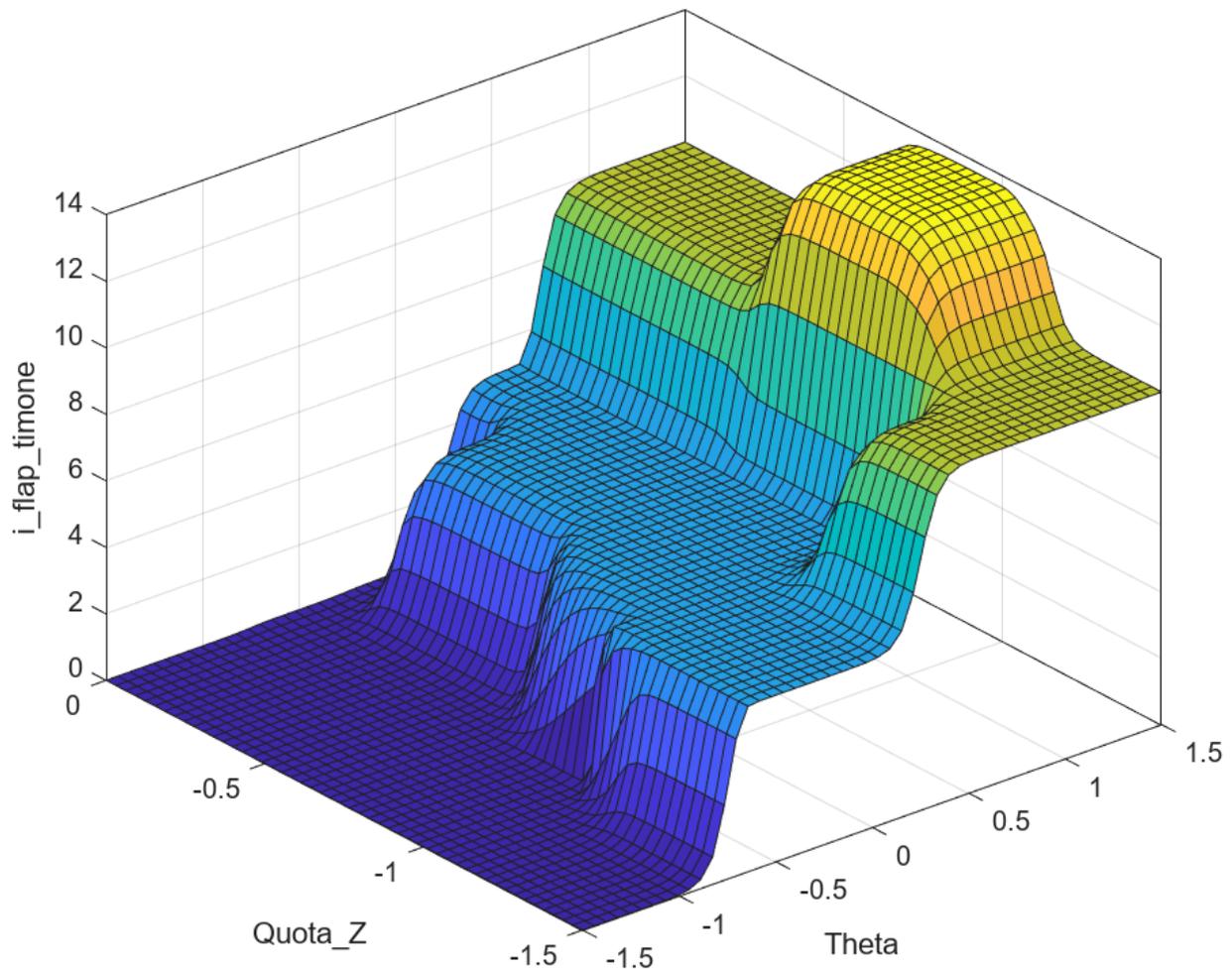


Figura 3.21 Superficie di controllo per attuazione del flap posteriore.

Si utilizza il metodo Mamdani per codificare l'evoluzione delle regole e l'aggregazione dei risultati delle regole. Per identificare il grado di attivazione delle classi di uscita si impostano le seguenti operazioni:

- intersezione degli insiemi FUZZY degli ingressi, attraverso il metodo dei minimi;
- unione degli insiemi FUZZY, attraverso il metodo di aggregazione dei massimi;
- *defuzzificazione*, attraverso il metodo del centro di massa.

I segnali di controllo in uscita sono opportunamente moltiplicati per dei fattori di scala. La determinazione di questi fattori di scala insieme alla progettazione delle regole della logica di controllo sono cruciali per la progettazione di un controllore FUZZY [14]. In questo modo le uscite di controllo di azionamento dei flaps delle appendici sono direttamente correlate al valore istantaneo degli ingressi.

La progettazione delle regole del controllore FUZZY per l'applicazione al caso studio di questo progetto di tesi segue i principi adottati da letteratura [14], con la differenza di aver creato due

ulteriori classi per la gestione della quota di navigazione nelle condizioni di imbarcazione dislocante e nel transitorio tra regime dislocante e foilante.

Queste classi di interferenza gestiscono le attuazioni dei flaps delle appendici nella fase più critica di progettazione del controllore di volo, dove le forti non linearità comportano instabilità del sistema. Il vantaggio del controllore FUZZY si dimostrerà evidente rispetto ai classici controllori PID sviluppati nel precedente capitolo.

Come si evince dalle superfici di controllo la gestione degli azionamenti per il controllo di quota e assetto segue una funzione definita nello spazio tridimensionale progettata con l'obiettivo di ottimizzare la risposta del controllore attraverso la lettura delle variabili in ingresso del sistema, fortemente non lineare, e la forza propulsiva riducendo le instabilità del sistema.

3.2.3 Applicazione logica FUZZY per la forza propulsiva

Inizialmente, la forza propulsiva è stata progettata seguendo delle rampe crescenti che portassero l'imbarcazione nella condizione di velocità di decollo, adeguata a generare la portanza necessaria per vincere le forze idrodinamiche resistenti sul sistema, per poi assestarsi ad un valore di picco costante una volta ottenuto il decollo e raggiunto l'obiettivo di quota di volo, garantendo l'equilibrio nelle condizioni di volo e assetto desiderate.

Tale considerazione comportava una forte instabilità dovuta all'interazione con i controllori di quota e assetto tradizionali PID, tarati con parametri identificati intorno alla condizione di equilibrio a regime di volo foilante.

Per tale motivo si è implementata una logica FUZZY che permettesse di modellare un profilo della forza propulsiva in funzione della velocità di navigazione e della quota di volo evitando l'interferenza con i controllori di quota e assetto.

In questa applicazione la logica FUZZY combinata alla base di conoscenza del sistema ha permesso di ottenere una superficie di interferenza che definisce un set di profili di propulsione, permettendo di simulare l'alimentazione, che richiederebbe un operatore addestrato. Tale applicazione si è dimostrata notevolmente utile ai fini del progetto data la complessità del sistema e la difficile modellazione matematica della forza propulsiva.

Gli ingressi del sistema FUZZY per la modellazione della forza propulsiva sono:

- Velocità longitudinale V_x ;
- Quota dell'imbarcazione Z .

Per ciascuna variabile viene definito un dominio di progettazione FUZZY che rappresenta i range variazionali massimi delle variabili misurate. Per ogni ingresso viene definito un *fuzzy set* che contiene le classi di appartenenza, che per ogni valore nel dominio descrive la variabile in una quantità FUZZY ed associa ad essa un grado di appartenenza.

Il primo passo di *fuzzificazione* converte le variabili di input in funzioni *fuzzificate* che codificano la lettura del valore numerico di ingresso in un algoritmo FUZZY nel dominio fondamentale.

$$Vx \in (0; 20)$$

$$Z \in (0, 2)$$

$$Vx = \{LOW, REGIME, HIGHT\}$$

$$Z = \{LOW, REGIME, HIGHT\}$$

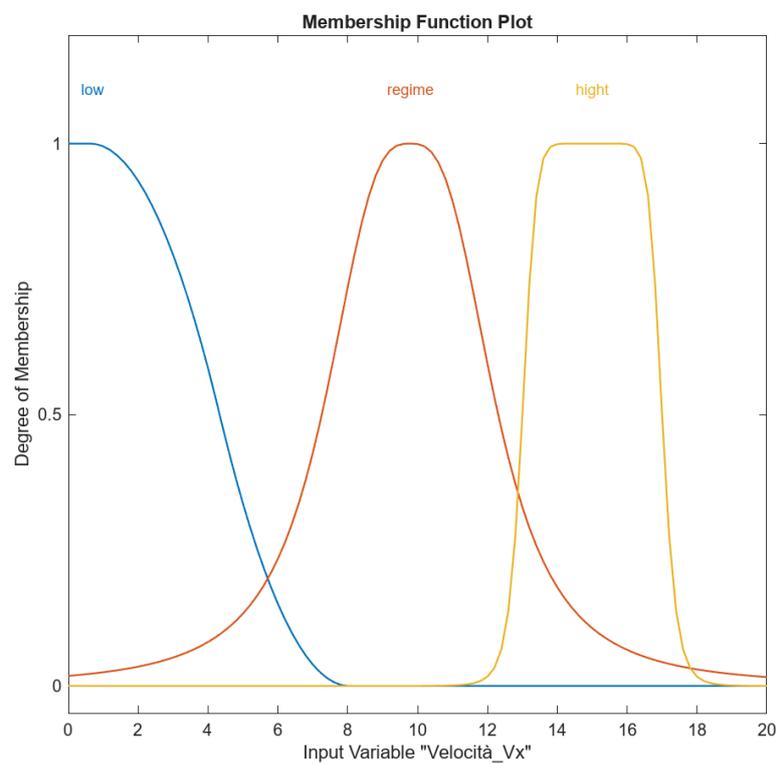


Figura 3.22 Classi di appartenenza della variabile in input velocità longitudinale.

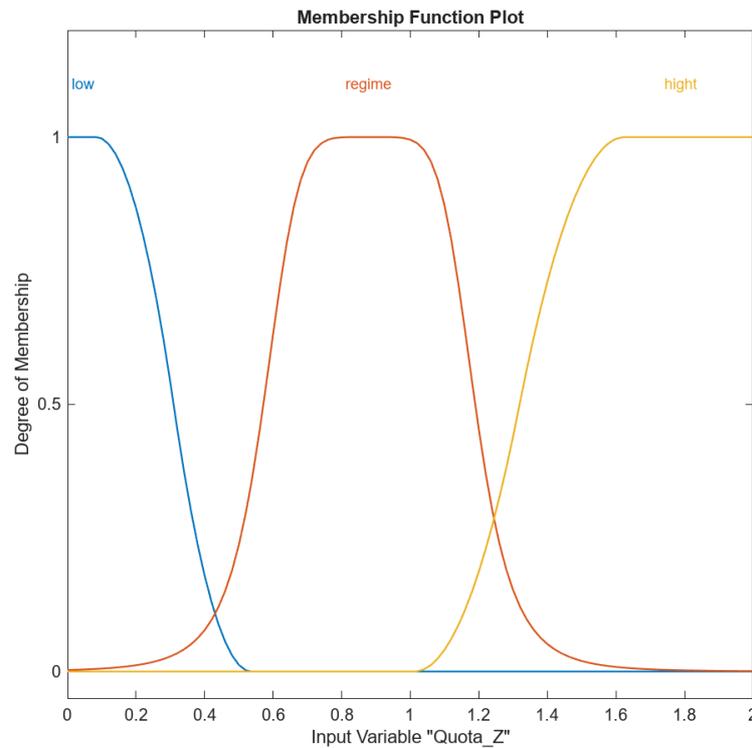


Figura 3.23 Classi di appartenenza della variabile in input Quota.

Analogamente si definisce il *fuzzy set* per l'uscita del sistema FUZZY, relativo alla forza propulsiva applicata dalla motorizzazione posta posteriormente al FOIL del timone. Anche per tale *fuzzy set* si definisce un dominio che rappresenta l'ampiezza dell'attuazione della motorizzazione.

$$TRUST \in (0; 100)$$

$$TRUST = \{T1, T2, T3, T4, T5\}$$

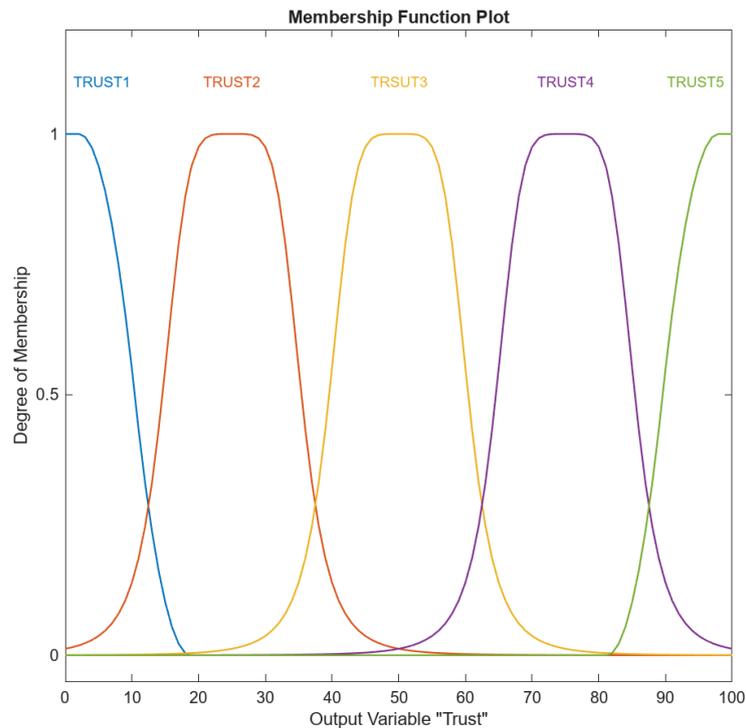


Figura 3.24 Classi di appartenenza della variabile in output forza propulsiva.

Il numero delle regole corrisponde a tutte le combinazioni possibili delle classi di appartenenza degli ingressi. Avendo sviluppato un sistema FUZZY con due ingressi e un'uscita, le regole implementate sono nove.

Una sintesi dalla matrice delle regole è data dalla matrice di Macvicar-Whelan, in cui alle classi degli ingressi vengono associate le classi dell'uscita. Vediamo nella tabella seguente la matrice di regole sviluppata per la forza propulsiva e successivamente la superficie di controllo ad essa relativa.

$Vx \setminus Z$	LOW	REGIME	HIGHT
LOW	T1	T3	T2
REGIME	T5	T4	T2
HIGHT	T1	T1	T1

Tabella 3.3 Regole logica FUZZY per la modellazione della forza propulsiva.

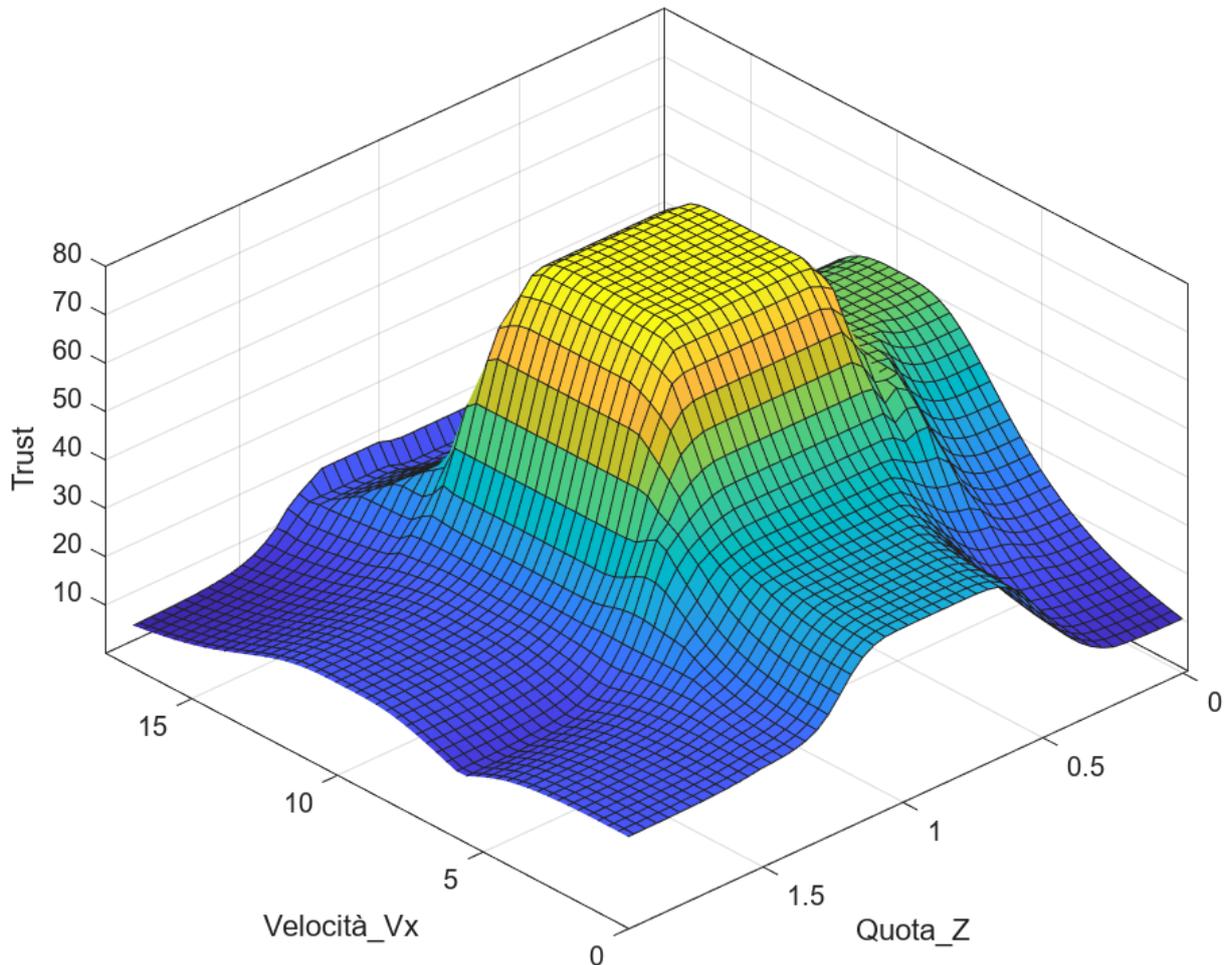


Figura 3.25 Superficie di controllo per attuazione forza propulsiva.

Anche in questo caso si utilizza il metodo Mamdani per codificare l'evoluzione delle regole e l'aggregazione dei risultati delle regole. Per identificare il grado di attivazione delle classi di uscita si impostano le seguenti operazioni:

- intersezione degli insiemi FUZZY degli ingressi, attraverso il metodo dei minimi;
- unione degli insiemi FUZZY, attraverso il metodo di aggregazione dei massimi;
- *defuzzificazione*, attraverso il metodo del centro di massa.

I segnali di controllo in uscita sono opportunamente moltiplicati per dei fattori di scala [15]. Il fattore di scala implementato nella progettazione della forza propulsiva permette di identificare l'equivalente valore in Newton necessario a garantire l'equilibrio dell'imbarcazione delle differenti condizioni di moto. Il fattore di scala, insieme alla progettazione delle regole della logica di FUZZY, sono cruciali per la progettazione del sistema FUZZY. In questo modo il valore dell'uscita è direttamente correlato al valore istantaneo degli ingressi.

4 Risultati

4.1 Risultati modello indisturbato

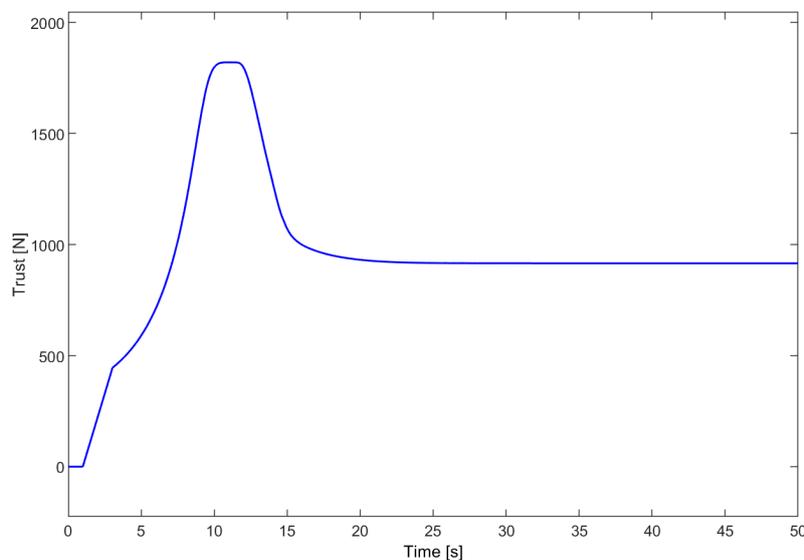
In questa sezione si espongono i risultati di simulazione del modello dinamico 6DOF la cui costruzione in ambiente di simulazione Matlab-Simulink è stata affrontata nel primo capitolo. Si mostrano gli andamenti dei principali parametri caratterizzanti la dinamica di volo dell'imbarcazione ottenuti dalle soluzioni delle equazioni di equilibrio nei sei gradi di libertà.

Si esplicitano i risultati del modello dinamico in due scenari in cui cambia la logica di controllo utilizzata relativamente alla gestione di quota ed assetto. Il primo scenario espone i risultati relativi ai controllori PID mentre il secondo scenario è relativo al controllore FUZZY.

Il primo parametro osservabile per entrambe gli scenari di controllo è l'andamento nel tempo della forza di propulsione Trust, la cui modellazione è stata implementata precedentemente nel capitolo 3. Il sistema FUZZY per la propulsione riceve in input la quota di volo e la velocità longitudinale dell'imbarcazione e fornisce in output un profilo di alimentazione progettato con l'obiettivo di simulare il comando di un operatore sulla manetta della motorizzazione.

Si osserva che il profilo della Trust cresce con una curva non lineare nella fase di moto dislocante, in cui lo scafo vince le forze di attrito dell'acqua e le forze idrodinamiche. Cresce fino a raggiungere il valore di picco e si stabilizza in corrispondenza della velocità e della quota di decollo.

Superata la quota di decollo la barca entra in regime foilante ma deve ancora raggiungere l'obiettivo target di quota e di velocità. Non avendo più nell'equilibrio del sistema le forze idrodinamiche legate allo scafo la forza propulsiva diminuisce dal valore di picco fino ad arrivare al valore di regime corrispondente alla condizione foilante target dell'imbarcazione.



4.1 Forza propulsiva di trust per il sistema 6DOF.

La curva della Trust rimane pressoché la stessa sia se sono applicati i controllori PID, sia se sono applicati i controllori FUZZY. Ciò che cambia notevolmente nei due casi sono le condizioni degli stati dell'imbarcazione le attuazioni dei controllori, e quindi, la valutazione degli angoli di attacco delle appendici e dei coefficienti idrodinamici.

Pertanto, osserviamo nelle figure seguenti, l'andamento degli stati relativi alle posizioni e agli angoli di Eulero, e ad essi associate le velocità e le accelerazioni nel caso in cui il controllo di quota ed assetto sia gestito dai controllori PID descritti in capitolo 3.

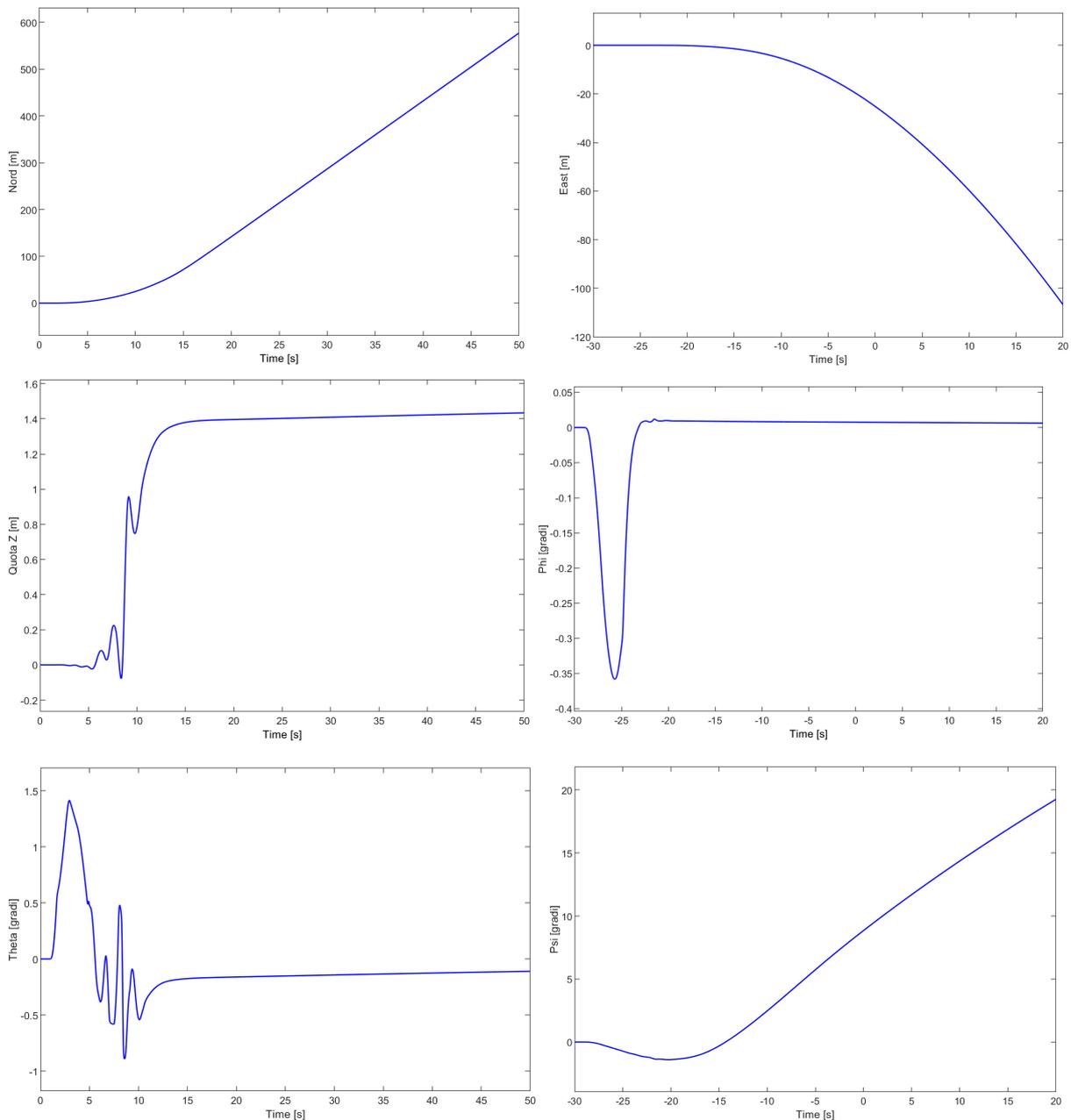


Figura 4.2 Andamento nel tempo delle posizioni e degli angoli di Eulero del sistema 6DOF con controllo PID.

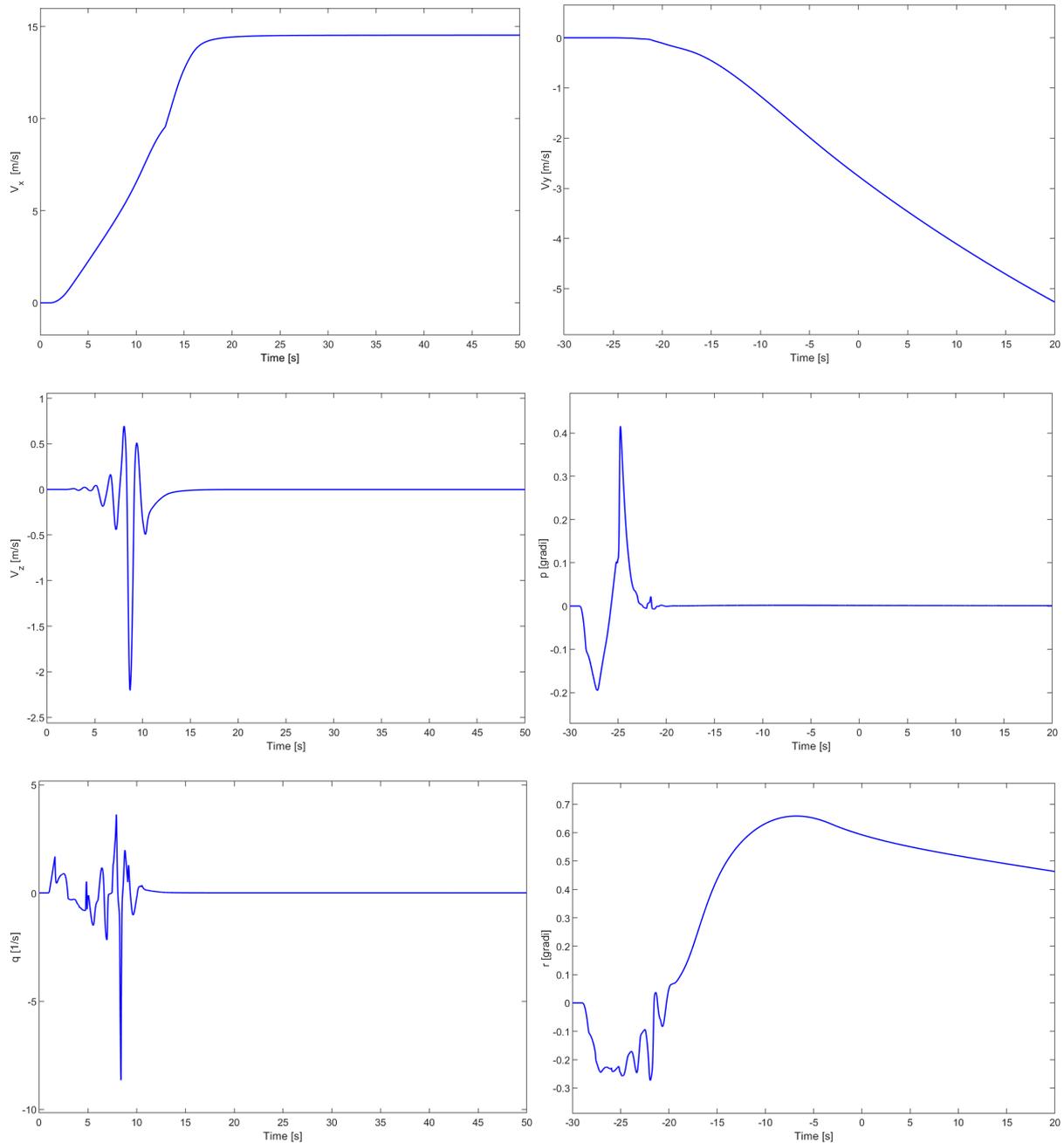


Figura 4.3 Andamento nel tempo delle velocità lineari e angolari del sistema 6DOF con controllo PID.

Analogamente, sono di seguito riportati i risultati degli andamenti degli stati relativi alla simulazione del sistema a sei gradi di libertà regolato con il controllore FUZZY.

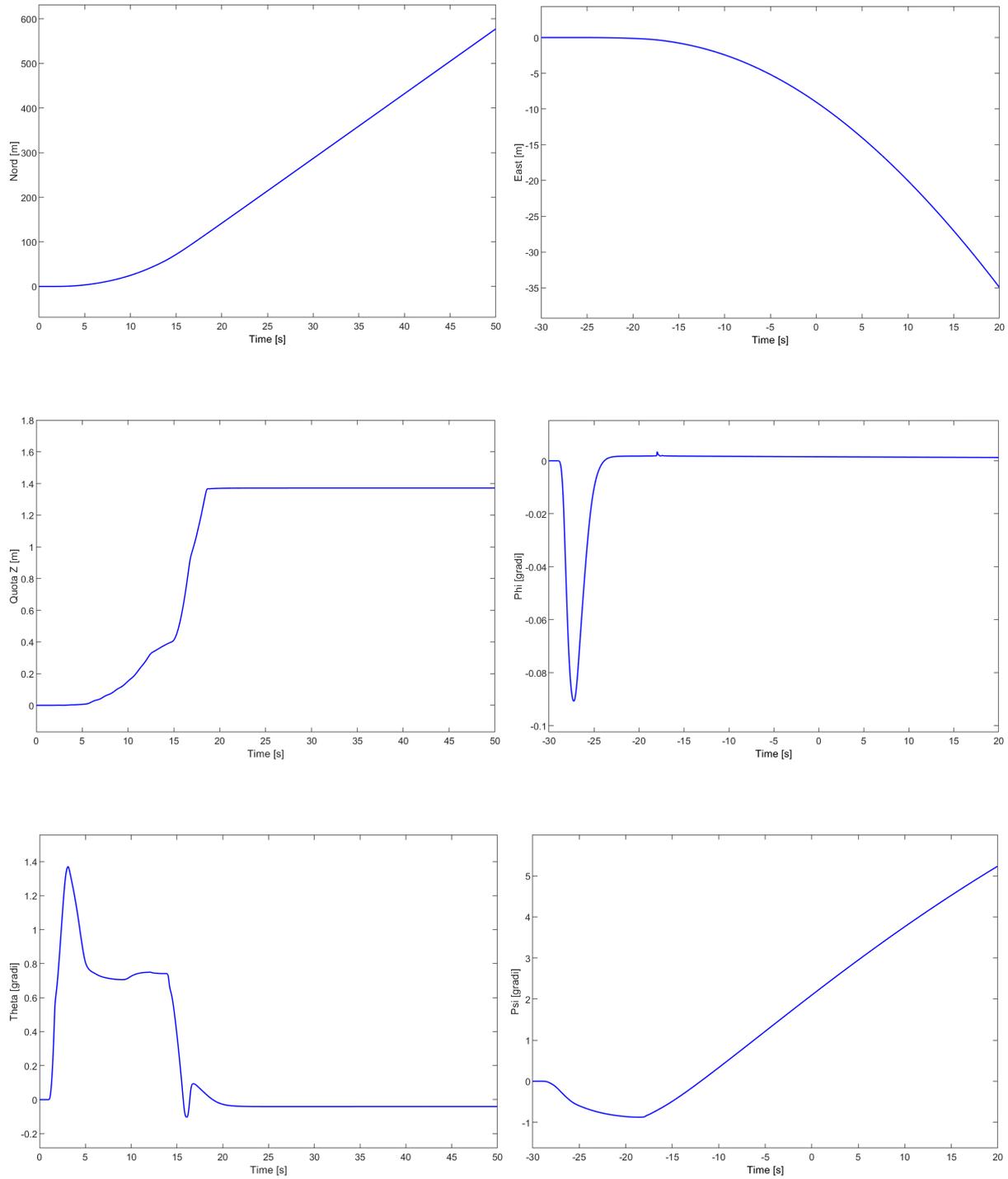


Figura 4.4 Andamento nel tempo delle posizioni e degli angoli di Eulero del sistema 6DOF con controllo FUZZY.

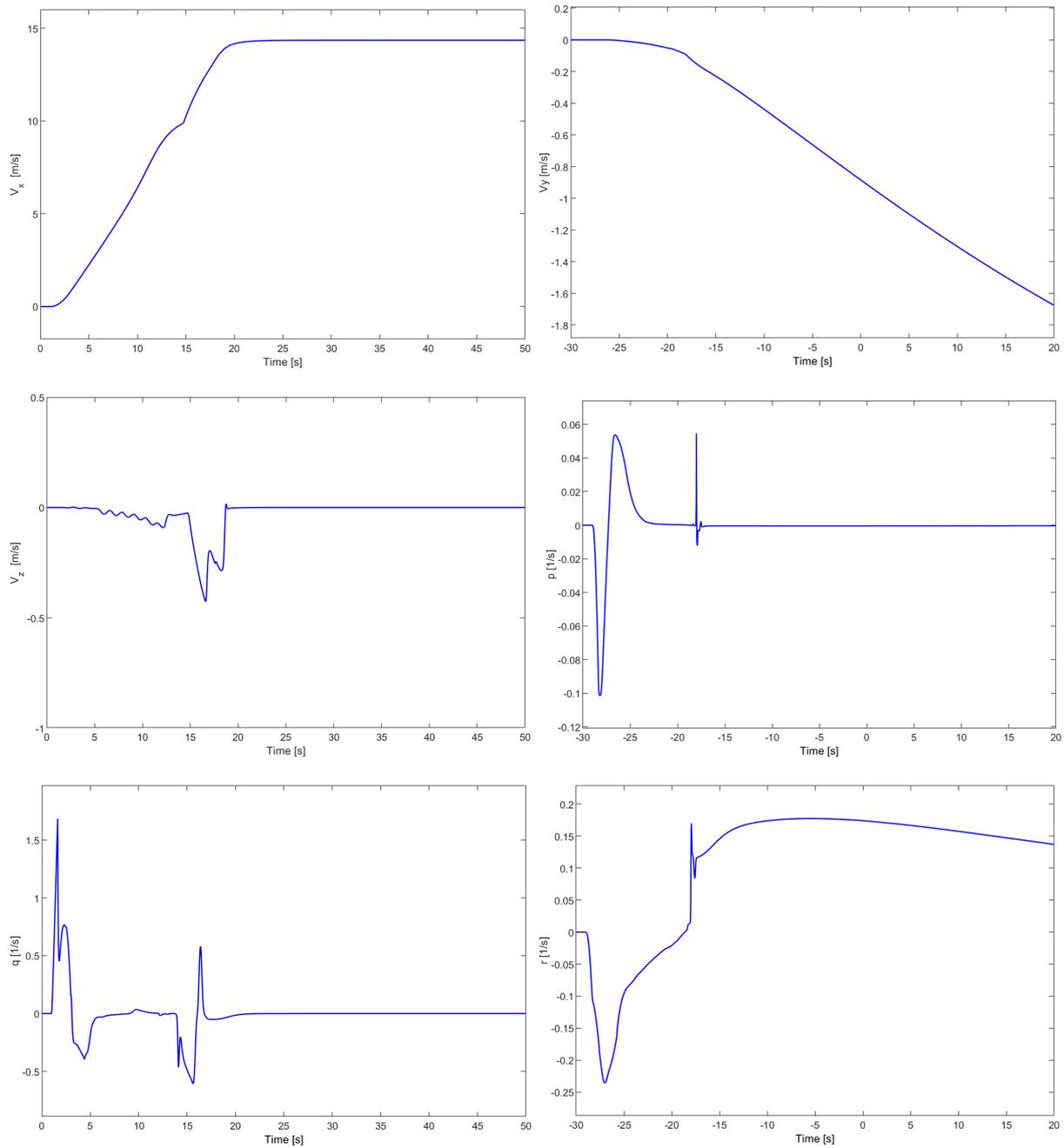


Figura 4.5 Andamento nel tempo delle velocità lineari e angolari del sistema 6DOF con controllo FUZZY.

Dal confronto dei risultati ottenuti nel tempo per la variazione degli stati del sistema si osserva, come previsto, che il controllore PID presenta forti oscillazioni sulla quota e sull'angolo di beccheggio a causa dei coefficienti k_p , k_i , k_d tarati per garantire una condizione di stabilità nell'intorno della condizione di regime ma che, nelle altre condizioni di moto, provocano grandi oscillazioni indesiderate. L'effetto di questa oscillazione si ripercuote fortemente anche sulla velocità angolare a beccheggio.

Mentre nella simulazione con il controllore FUZZY i risultati mostrano che le logiche di regolazione che non provocano alcuna instabilità negli stati transitori di decollo, garantendo dei range di variazione di molto inferiori a quelli misurati nel sistema con il precedente controllore.

Si osserva un andamento della velocità longitudinale pressoché identica per entrambi i controllori mentre la velocità verticale di sollevamento risulta significativamente maggiore e meno stabile nel caso di controllori PID rispetto a quella in cui si adoperava il controllo FUZZY.

Si osservano gli azionamenti dei flaps delle appendici foilanti nel tempo, compiute dai due controllori a confronto, espressi in Figura 4.6, dove sulla sinistra si mostrano i risultati per il controllore PID mentre sulla destra quelli per il controllore FUZZY.

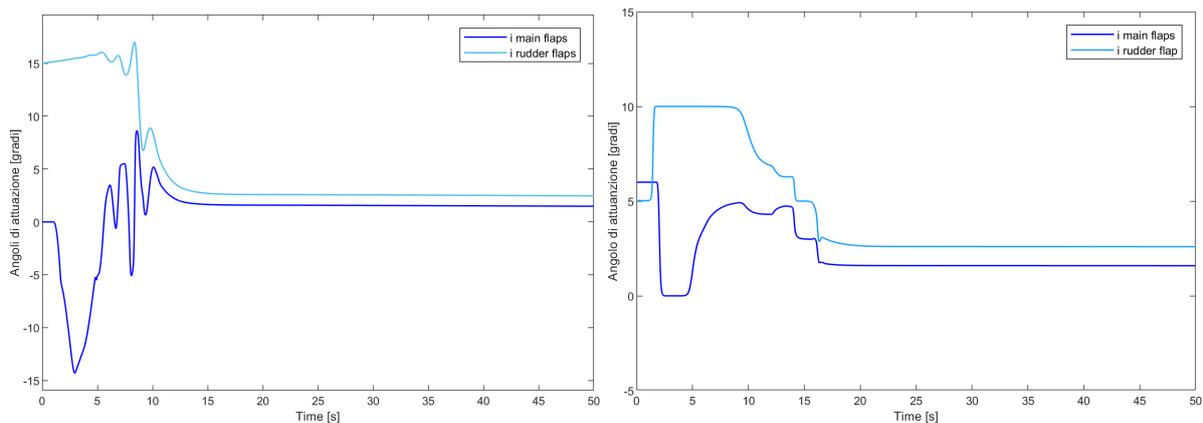


Figura 4.6 Andamento nel tempo dei segnali di controllo dei flaps per controllori PID e controllore FUZZY.

Tali azionamenti vengono inseriti nel sistema di simulazione come contributo continuo di variazione dell'angolo di attacco dei FOILS orizzontali. Nelle figure seguenti vengono rappresentati tutti i parametri che contribuiscono alla definizione dell'angolo di attacco dei FOILS delle tre appendici aerodinamiche: anteriore sinistra, anteriore destra e del timone. Sono rappresentati sulla destra i risultati con il controllo PID e sulla sinistra i risultati per il controllo FUZZY.

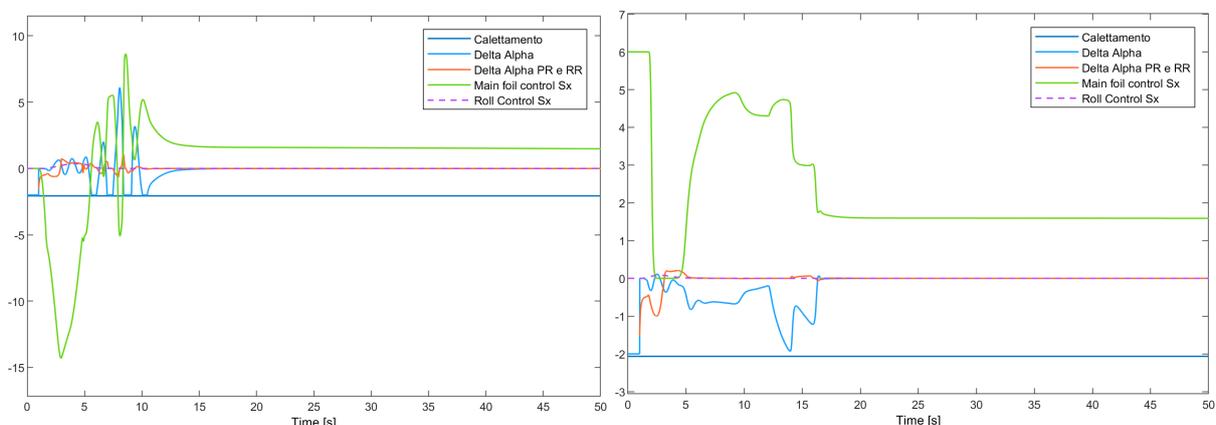


Figura 4.7 Contributi di angolo di attacco per il FOIL dell'appendice anteriore sinistra (PID sinistra, FUZZY Destra).

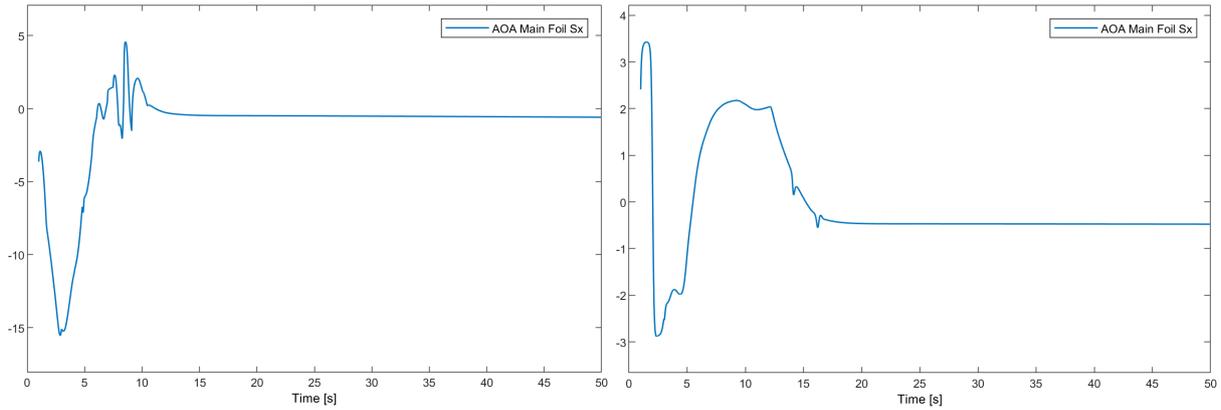


Figura 4.8 Andamento nel tempo angolo di attacco FOIL appendice anteriore sinistra (PID sinistra, FUZZY Destra).

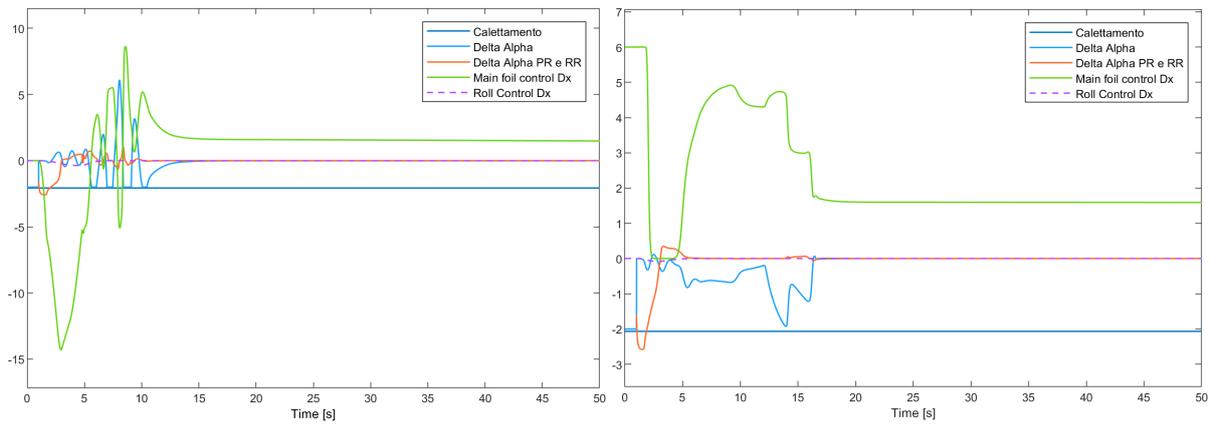


Figura 4.9 Contributi di angolo di attacco per il FOIL dell'appendice anteriore destra (PID sinistra, FUZZY Destra).

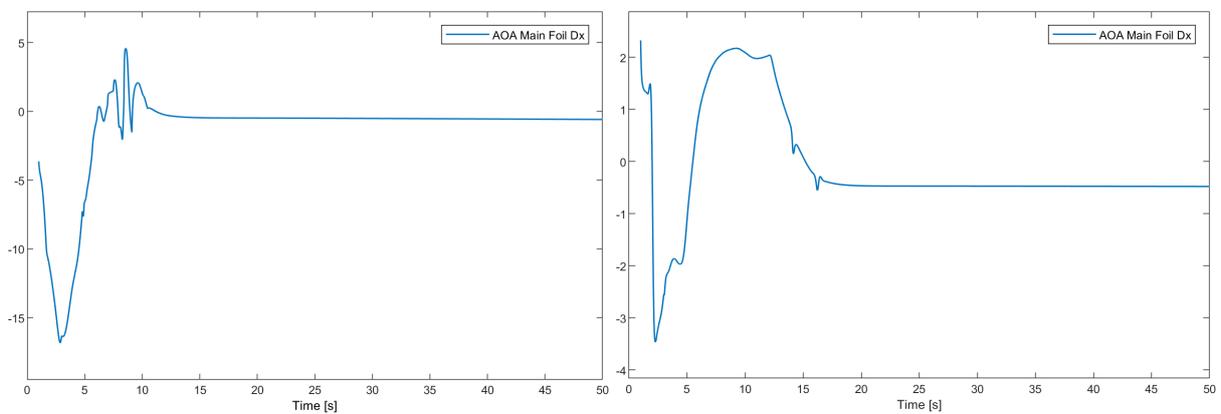


Figura 4.10 Andamento nel tempo angolo di attacco FOIL appendice anteriore destra (PID sinistra, FUZZY Destra).

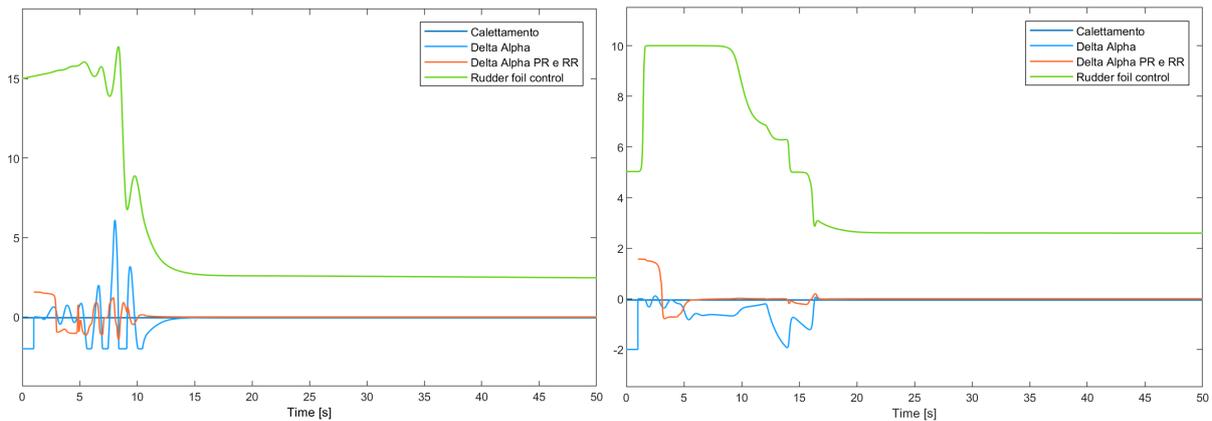


Figura 4.11 Contributi di angolo di attacco per il FOIL del timone (PID sinistra, FUZZY Destra).

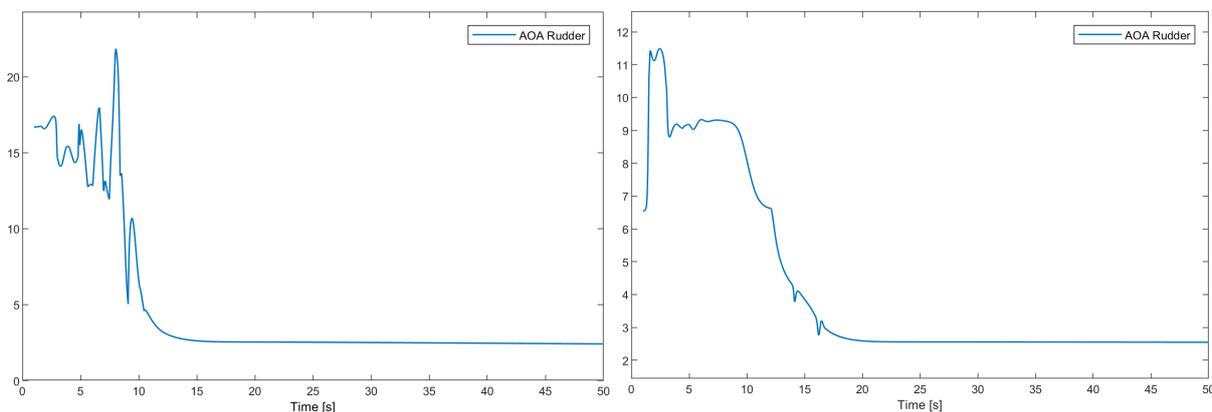


Figura 4.12 Andamento nel tempo angolo di attacco FOIL del timone (PID sinistra, FUZZY Destra).

Da questi grafici si osserva molto chiaramente come viene gestito dai due controllori, PID e FUZZY, l'angolo di attacco dei FOILS delle appendici, fondamentali per la valutazione dei coefficienti aerodinamici di portanza e resistenza e la scrittura delle equazioni di equilibrio nei sei gradi di libertà delle relative forze. Le differenze evidenti della gestione dell'angolo di attacco dei due controllori, evidenziano per il caso del PID forti oscillazioni che provocano l'instabilità del sistema, mentre il caso del FUZZY adatta in modo più performante gli angoli di attacco delle appendici garantendo un'alta efficienza e stabilità, che notiamo dalle oscillazioni meno brusche.

4.2 Impostazione disturbi e risultati a confronto

Dallo sviluppo del modello dinamico a sei gradi di libertà, per entrambe le opzioni di controllo, si è identificato il moto dell'imbarcazione, dalla condizione di partenza fino alle condizioni di volo stabile nell'intorno della quota e dell'assetto target. Per valutare la stabilità dinamica del sistema, la robustezza e l'adattabilità dei controllori si perturbano le condizioni all'equilibrio in regime di volo foilante con diverse tipologie di disturbi esterni. Vengono considerati i seguenti disturbi:

- Carico applicato nel baricentro pari a 200 Kg;
- Raffiche di vento contrario pari a circa 50 nodi;
- Disturbo di onda sinusoidale di ampiezza di 30 cm e periodo di oscillazione 0,5 secondi.

Per ogni scenario si confrontano i risultati degli stati del sistema per i due sistemi di controllo, con l'obiettivo di identificare come questi adattano le attuazioni dei flaps al fine di perseguire gli obiettivi in termini di gestione della quota di volo e dell'angolo di beccheggio.

Caso 1 – Scenario con disturbo carico applicato nel baricentro

Il disturbo a gradino di carico pari a 200 kg è applicato nel baricentro dell'imbarcazione, per tanto viene definito come segue il segnale all'interno del sistema dinamico. Il vettore di sei componenti identifica la forza risultante dal disturbo, questa viene inserita nella matrice di valutazione di forze e momenti esterni, τ_{RB} , definita nel primo capitolo.

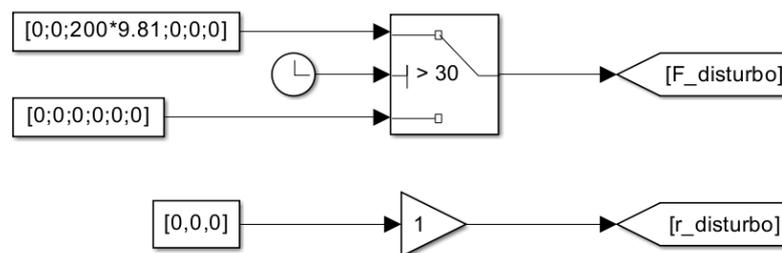


Figura 4.13 Schema a blocchi in ambiente Simulink del disturbo.

Si osserva come il carico imposto provoca una riduzione della quota di volo dell'imbarcazione. Nel caso PID esposto sulla sinistra la riduzione è più pronunciata e porta una riduzione di circa 10 cm della quota di volo, rispetto alle condizioni di equilibrio, mentre nel caso FUZZY la riduzione di quota risulta pari alla metà del precedente controllore.

Si nota per la quota che il tempo di assestamento per il controllore PID è molto più lungo rispetto a quello del controllore FUZZY. Un tempo di assestamento lungo indica una dinamica lenta, ma può favorirne la stabilità. Se troppo lungo si traduce in un sistema che non risponde adeguatamente ai disturbi rapidi.

La velocità di sollevamento fluttua molto di più nel PID che nel FUZZY, il che è una prima dimostrazione dell'efficacia del secondo controllore, in grado di garantire un comfort più elevato. Si nota nel PID una più elevata sovra elongazione ed un maggior tempo di assestamento rispetto al caso FUZZY, per i quali però si identifica lo stesso errore statico a regime.

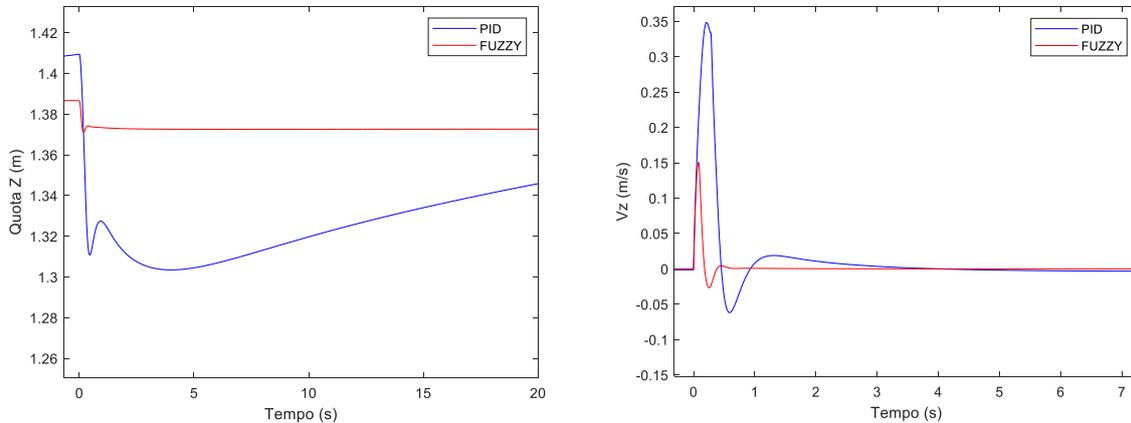


Figura 4.14 Confronto andamento stati Quota e Velocità di sollevamento per i controllori PID e FUZZY.

La variazione dell'angolo di beccheggio nel primo controllore ha un'oscillazione di ampiezza totale di circa 0,3 gradi rispetto alla condizione di equilibrio, mentre nel secondo controllore l'oscillazione varia di 0,1 gradi, si adatta più rapidamente e si avvicina maggiormente all'obiettivo di controllo richiedente un assetto di navigazione con beccheggio nullo. La velocità angolare a beccheggio mostra come il controllore PID presenti picchi di maggiore intensità ed una risposta più lenta rispetto al controllore FUZZY.

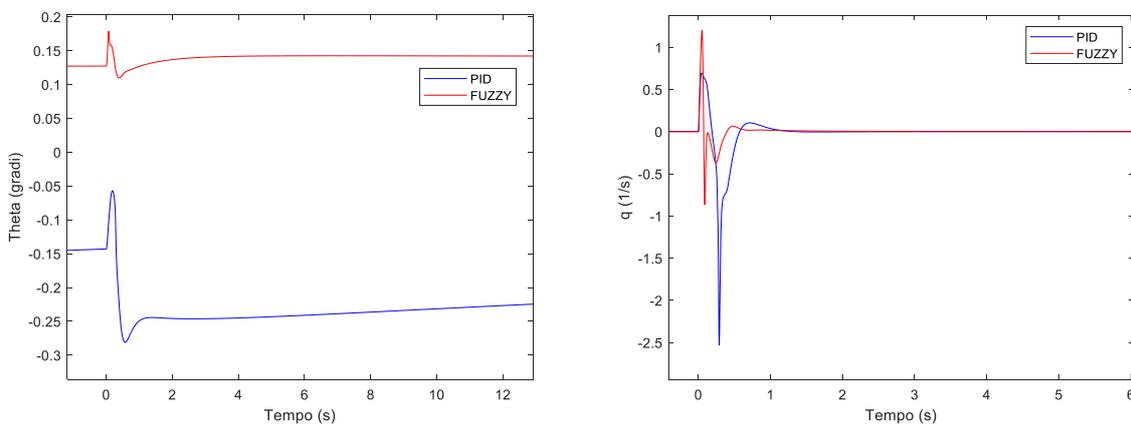


Figura 4.15 Andamento nel tempo di Theta e q per i controllori PID e FUZZY.

La velocità di crociera per il primo controllore si riduce in modo più significativo del secondo controllore. Ciò è dovuto ad una migliore gestione degli angoli di attacco dei FOILS permettendo di ottimizzare l'efficienza delle appendici ed avere una riduzione minima della velocità di crociera.

Le accelerazioni dei relativi stati permettono di valutare le condizioni di comfort di navigazione. La norma ISO 2631 [17] è una serie di standard che permette di valutare l'esposizione umana alle vibrazioni del sistema su cui è in moto, valutandone il comfort e la salute e le percezioni dei passeggeri. Dalle seguenti immagini si osservano i valori di accelerazione nelle relative direzioni, che possono essere riferite all'accelerazione gravitazionale terrestre.

I range tipici delle accelerazioni per imbarcazioni foilanti che garantiscono delle condizioni di comfort accettabili sono riportati nella seguente tabella per ogni grado di libertà relativo al moto longitudinale. Oltre tali valori gli effetti percepiti si intensificano e possono verificarsi problematiche di salute (nausea, perdita di equilibrio).

Accelerazione	Range comfort	Effetto percepito
Lungo X, avanzamento	0,1 – 0,5 [g]	Sensazioni di accelerazioni o frenata
Lungo Z, sollevamento	0,2 – 1,5 [g]	Impatti verticali e mal di mare
Attorno a Y, beccheggio	5-10 [1/s ²]	Sensazione di squilibrio in avanti o indietro

Tabella 4.1 Effetto percepito delle accelerazioni [17].

Le accelerazioni identificate scalate sulla forza gravitazionale rientrano nei range di comfort previsti da normativa ed è importante notare come il controllore FUZZY registri oscillazioni meno intense adattandosi molto più velocemente al disturbo e garantendo un comfort maggiore di navigazione lungo ogni grado di libertà longitudinale.

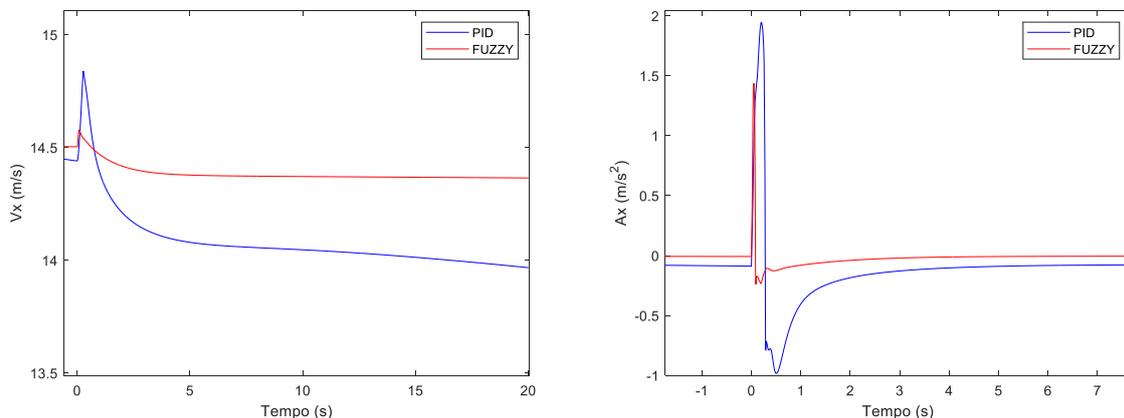


Figura 4.16 Andamento nel tempo di V_x ed A_x per i controllori PID e FUZZY.

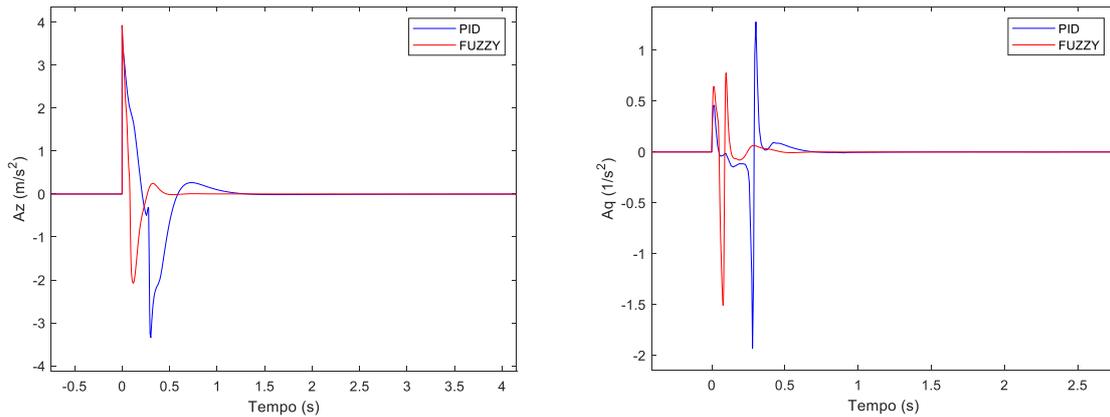


Figura 4.17 Andamento nel tempo di Az ed Aq per i controllori PID e FUZZY.

I risultati appena discussi sono dovuti alla progettazione delle logiche di gestione quota e assetto dei controllori; perciò, di seguito sono riportati gli andamenti delle attuazioni dei flaps nel tempo.

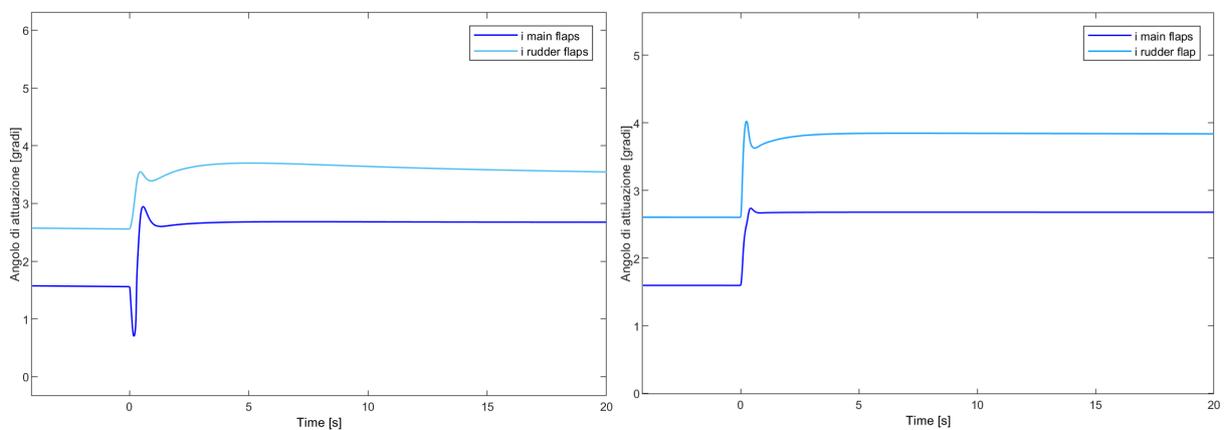


Figura 4.18 Andamento nel tempo dei contributi di angolo di attuazione per controllori PID e FUZZY.

Caso 2 – Scenario con raffiche di vento contrario di circa 50 nodi

Il disturbo dovuto a vento contrario viene modellato come una forza aerodinamica che dipende dalla velocità tra il vento e l'imbarcazione:

$$F_{res} = \frac{1}{2} \rho A C_d (V_{vento}^2 - V_{barca}^2)$$

Considerando la densità dell'aria, il coefficiente di resistenza aerodinamica C_d e l'area frontale dell'imbarcazione. Tale disturbo è rappresentato con un vettore di sei elementi in cui il disturbo

è la componente longitudinale che si oppone al moto, riferita al sistema di riferimento Earth. Questo viene applicato alla condizione di equilibrio in regime di volo per entrambe i controllori.

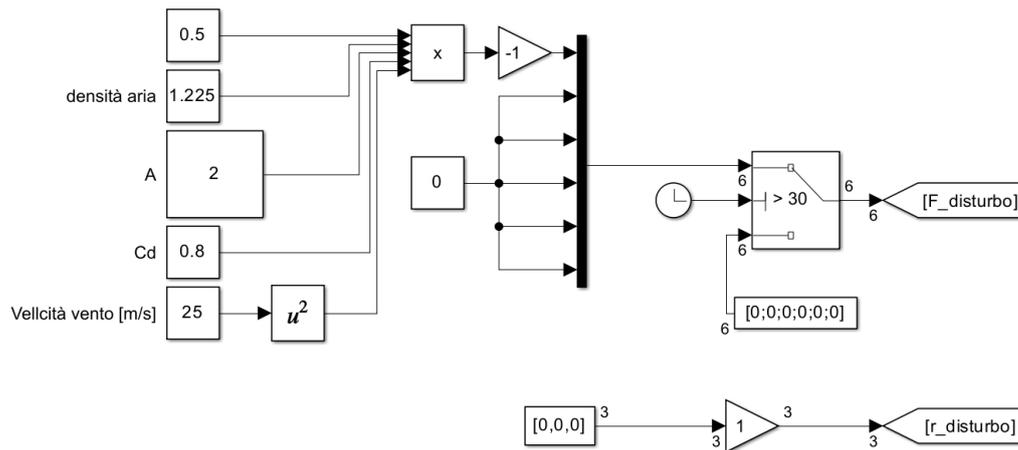


Figura 4.19 Schema a blocchi in ambiente Simulink del disturbo.

I risultati espressi nelle seguenti immagini riportano per il sistema controllato tramite PID una diminuzione di quota di circa 10 cm con un successivo riassetto intorno alla quota regime, mentre nel caso controllato con il FUZZY la riduzione di quota risulta di un ordine di grandezza inferiore, senza oscillazioni e con un rapido assestamento nelle nuove condizioni di equilibrio. Questi dati combinati con velocità nella direzione verticale confermano il miglior adattamento del secondo controllore, rendendo pressoché impercettibile il disturbo.

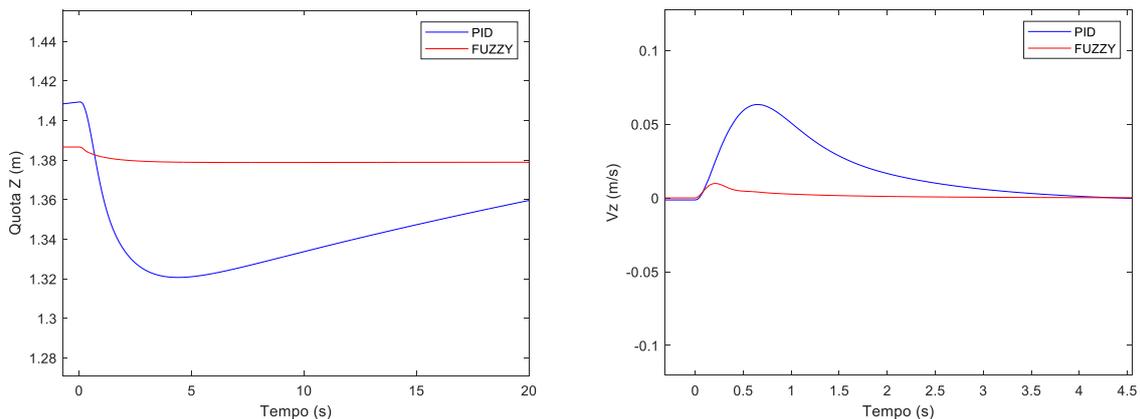


Figura 4.20 Andamento Quota e Velocità di sollevamento per i controllori PID e FUZZY.

Per quanto riguarda la risposta a beccheggio osserviamo un comportamento del sistema per i due controlli pressoché analogo in termini di ampiezza di variazione, ma il secondo controllore raggiunge le nuove condizioni di equilibrio molto più rapidamente. In termini di velocità angolare a beccheggio si osserva come la risposta del sistema sia gestita in modo più ottimale dal controllore FUZZY per un'analogia durata del transitorio.

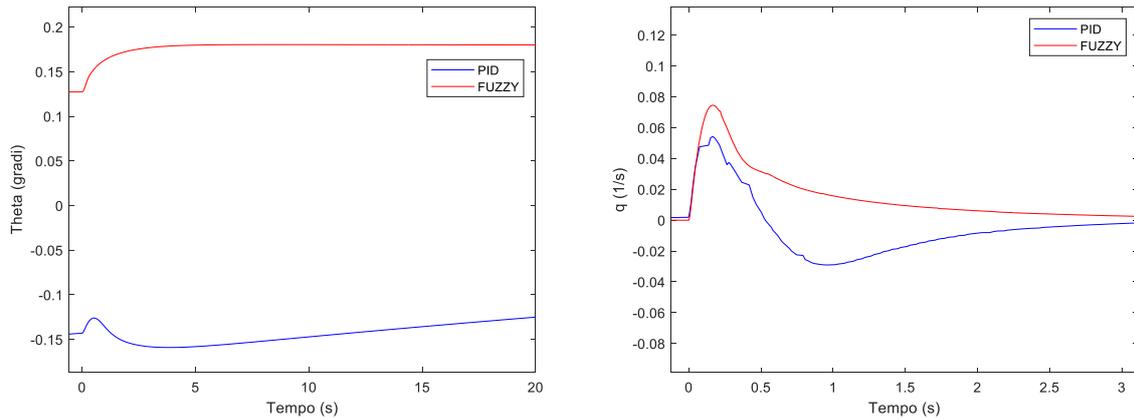


Figura 4.21 Andamento nel tempo di Theta e q per i controllori PID e FUZZY.

La velocità longitudinale per il controllo PID si degrada in modo molto più significativo, mentre nel FUZZY si assesta ad un valore inferiore rispetto alla condizione indisturbata di 1 m/s, corrispondente a circa 2 nodi. Il controllore FUZZY adatta le attuazioni dei flaps in modo più efficiente riuscendo a garantire una condizione di navigazione ottimale sotto lo stress del disturbo, risultando un controllore più robusto senza compromettere le prestazioni.

Le condizioni di comfort registrate per il disturbo in esame identificano degli andamenti paragonabili nella direzione longitudinale e nella rotazione a beccheggio, a vantaggio del FUZZY, ma in particolare lungo la direzione verticale risulta evidente la minor sovra elongazione, la maggiore rapidità di adattamento ed il minor transitorio del controllore FUZZY.

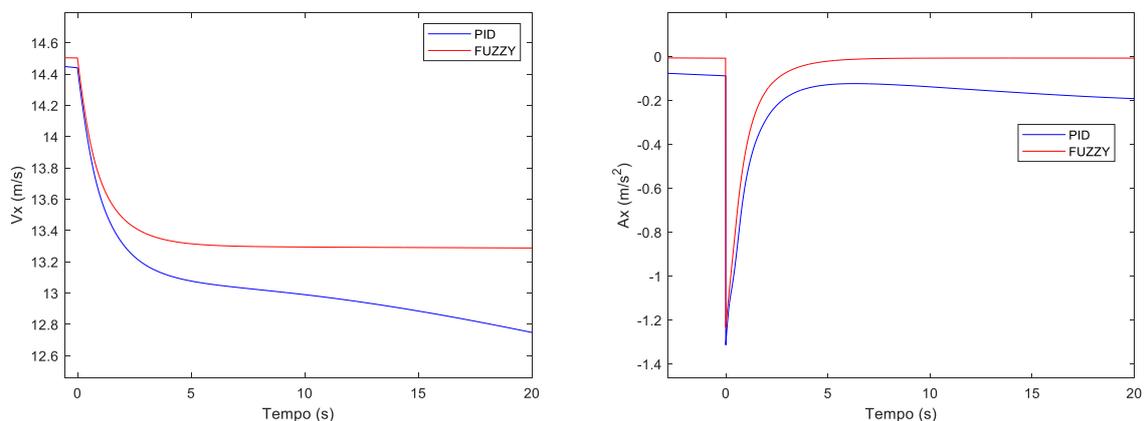


Figura 4.22 Andamento nel tempo di V_x ed A_x per i controllori PID e FUZZY.

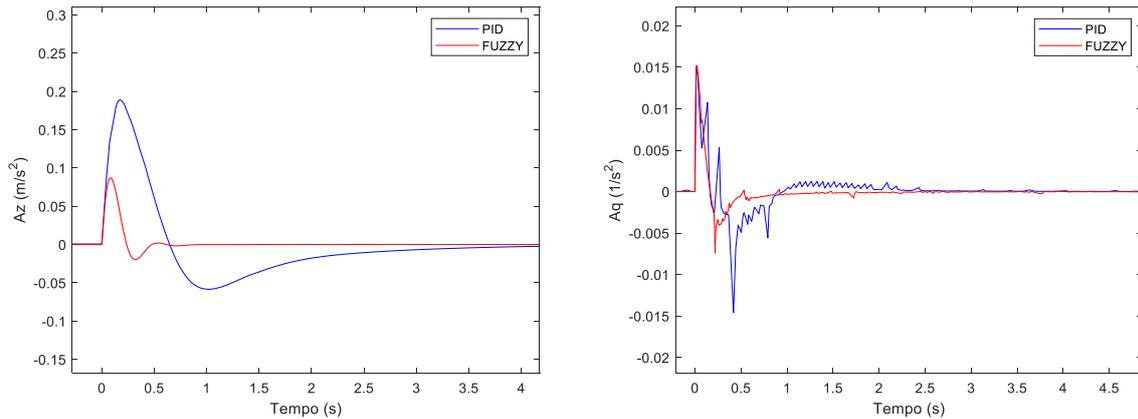


Figura 4.23 Andamento nel tempo di Az ed Aq per i controllori PID e FUZZY.

I risultati appena discussi sono dovuti alla progettazione delle logiche di gestione quota e assetto dei controllori; perciò, di seguito sono riportati gli andamenti delle attuazioni dei flaps nel tempo.

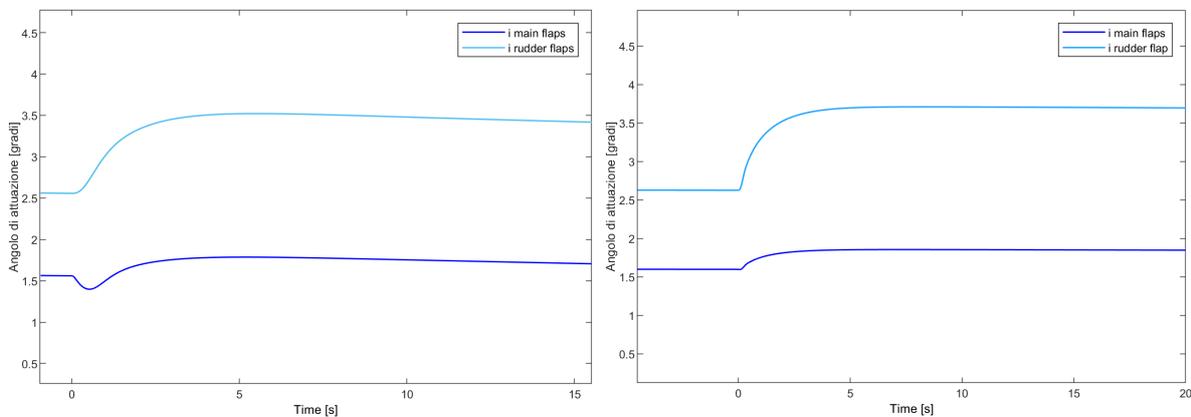


Figura 4.24 Andamento nel tempo dei contributi di angolo di attuazione per controllori PID e FUZZY.

Caso 3 – Scenario con disturbo sulla lettura della quota di volo

Per valutare la robustezza dei controllori è verificare la bontà della taratura dei parametri di progettazione degli stessi è fondamentale studiare la risposta del sistema sottoposto ad un disturbo sinusoidale che simula il moto ondoso.

Si sono implementati vari scenari di disturbo, in questa trattazione si riporta un disturbo ondoso di ampiezza di 30 cm ed una frequenza di circa 2 rad/s, periodo di 0,5 secondi. Tale disturbo impatta direttamente il valore di quota misurata dai controllori.

Per il controllore PID si osserva una fluttuazione di quota molto più ampia rispetto al controllore FUZZY. Per il primo controllore si registra una ampiezza totale di 40 cm intorno al punto di

equilibrio dello stato stazionario precedente alla perturbazione, mentre per il controllore FUZZY si ha una fluttuazione di soli 10 cm rispetto alle condizioni indisturbate, mentre gli andamenti della velocità verticale risultano analoghi a vantaggio del FUZZY.

La convenienza del FUZZY è legata ad un'efficace taratura dei coefficienti di scala del controllore che permette di proporzionare gli effetti degli output di attuazioni per appendici anteriori e posteriori e garantire la migliore adattabilità del controllore alle condizioni di disturbo.

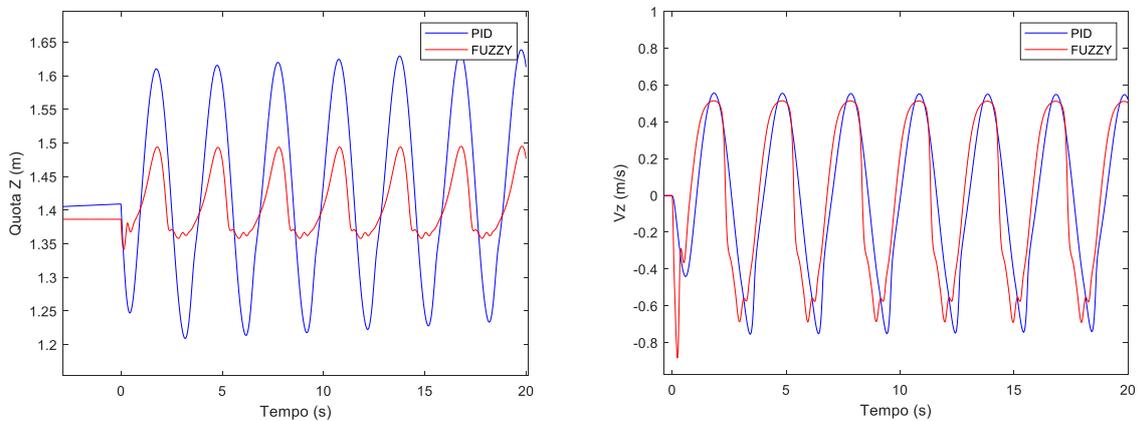


Figura 4.25 Andamento Quota e Velocità di sollevamento per i controllori PID e FUZZY.

Inoltre, per oscillazione a beccheggio si nota un altro importante risultato: il primo controllore ha un'oscillazione di beccheggio nell'intorno del punto di equilibrio molto ampio, di circa 0,5 gradi; mentre per il controllore FUZZY i risultati mostrano un'oscillazione di beccheggio di circa 0,1 grado, con un controllo rapido che permette di contenere l'oscillazione superiore a beccheggio, ma con un andamento frenetico. Questo comporta un aumento delle velocità angolari e delle accelerazioni, ma i valori rientrano ampiamente nei range di comfort.

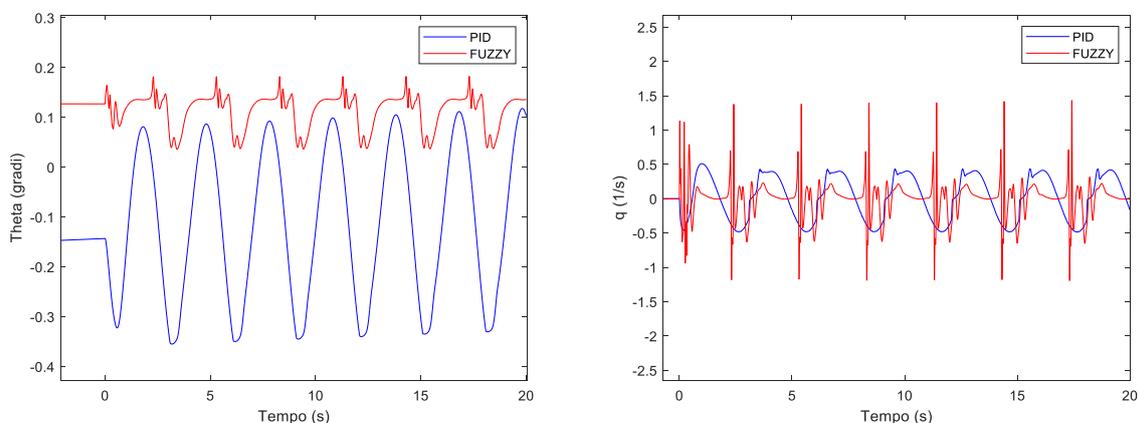


Figura 4.26 Andamento nel tempo di Theta e q per i controllori PID e FUZZY.

La velocità longitudinale nel caso del controllore PID si degrada notevolmente mentre nel FUZZY oscilla di mezzo nodo intorno alla condizione di equilibrio. Questo risultato è dovuto alla migliore robustezza del controllore FUZZY che, gestendo le attuazioni dei flap, permette di identificare delle configurazioni di assetto delle appendici ottimali, che non deperiscono di efficienza a causa della perturbazione.

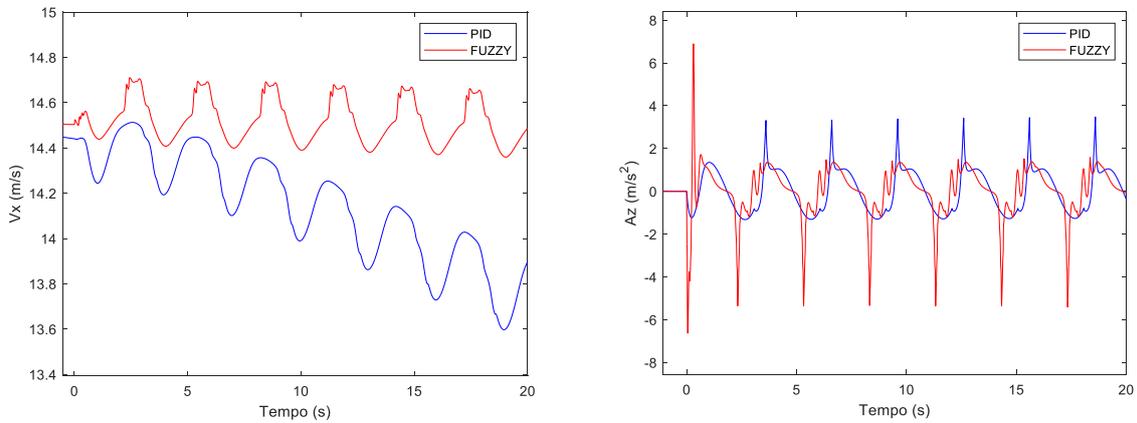


Figura 4.27 Andamento nel tempo di V_x ed A_z per i controllori PID e FUZZY.

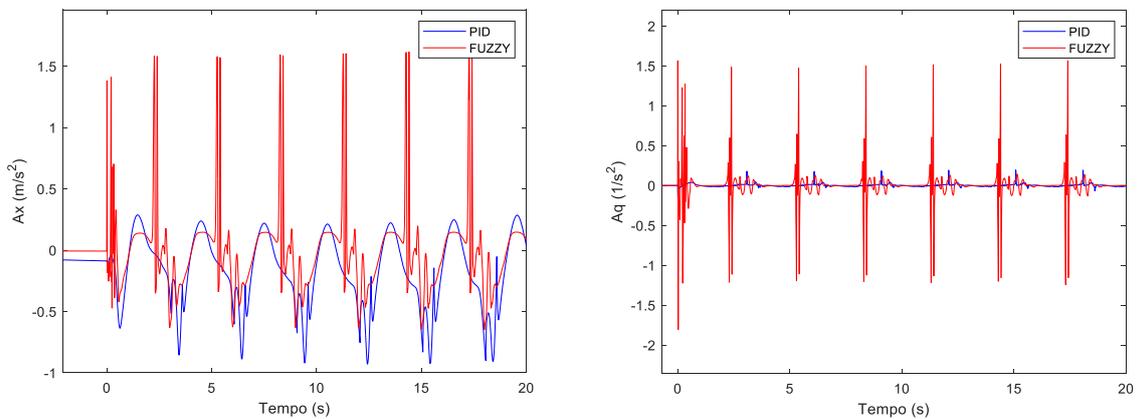


Figura 4.28 Andamento nel tempo di A_z ed A_q per i controllori PID e FUZZY.

I risultati appena discussi sono dovuti alla progettazione delle logiche di gestione quota e assetto dei controllori; perciò, di seguito sono riportati gli andamenti delle attuazioni dei flap nel tempo.

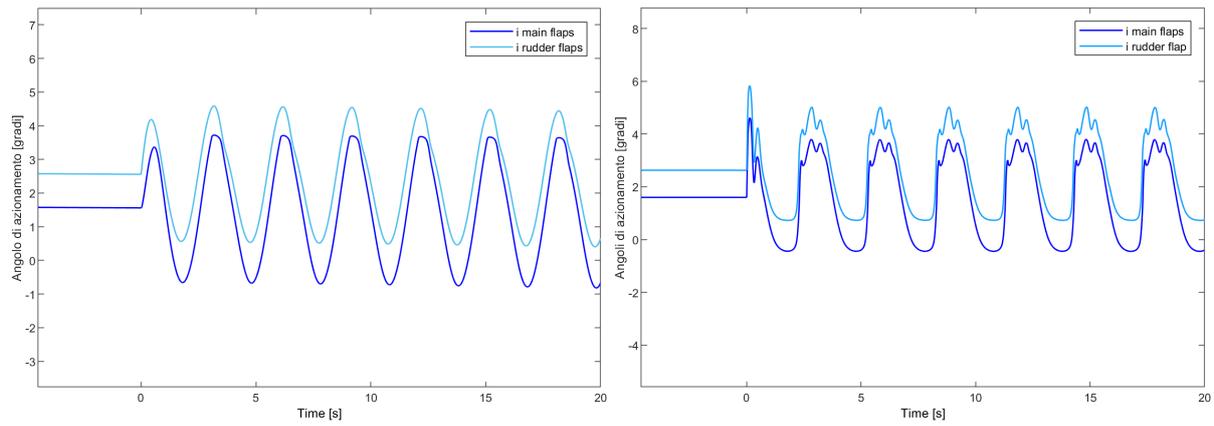


Figura 4.29 Andamento nel tempo dei contributi di angolo di attuazione per controllori PID e FUZZY.

5 Tool di valutazioni power train e consumi

5.1 Obiettivi

Come visto nel capitolo introduttivo, l'innovazione degli HYDROFOIL sta velocemente conquistando una parte sempre più grande del mercato nel settore delle imbarcazioni day cruiser e del trasporto marittimo urbano. Il principale modello di confronto commerciale con l'applicazione sviluppata in questo progetto è l'esemplare C-7 dell'azienda Candela, omologato per 6 passeggeri, con un peso dello scafo di soli 350 Kg, un motore elettrico da 55 KW ed un pacco batteria di 44KWh, come riportato in [1].



Figura 5.1 Candela C-7 elettrica [18].

L'obiettivo di questa valutazione è dimensionare le motorizzazioni elettriche e ad idrogeno dell'imbarcazione oggetto di questo studio, valutando il trade off fra le due applicazioni. Partendo dai dati di simulazione di massa a vuoto della barca, di massa totale di carico, di velocità a regime di navigazione e della forza propulsiva, ci si pone l'obiettivo di sviluppare un tool che paragoni l'applicazione di due motorizzazioni, elettrica e a cella a combustibile a idrogeno, identificando per ogni scenario di stress dei riferimenti commerciali e confrontandone i vantaggi e gli svantaggi in termini di pesi e volume delle motorizzazioni, numero di passeggeri trasportabili e costo, in vari scenari di stress.

Ci si aspetta dai risultati di notare una convenienza di impiego del motore elettrico per basse autonomie e distanze, mentre per tratte più lunghe e potenze richieste più elevate dovrebbe prevalere la convenienza di applicazioni con motorizzazioni ad idrogeno.

5.2 Sviluppo del Tool

Si considerano i dati di partenza relativi alla massa totale dell'imbarcazione partizionata in:

- massa dello scafo, scocca in carbonio che comprende tutta la componentistica di bordo;
- massa delle appendici aerodinamiche che sviluppano portanza;
- massa della motorizzazione, considera il motore e il sistema di trasmissione;
- massa dello stoccaggio di energia, batterie o serbatoio di idrogeno e Fuel Cell;

La valutazione preliminare di queste masse parte da ipotesi adottate in collaborazione con il team di ricerca presso cui ho sviluppato questo progetto di tesi. Si stimano, per un'imbarcazione alimentata da una motorizzazione con cella di combustibile ad idrogeno, le seguenti proporzioni in massa:

Proporzioni masse per imbarcazione ad idrogeno [%]	
massa a vuoto	0,6
massa foil	0,2
massa motore + storage	0,15
massa trasmissione	0,05

Tabella 5.1 Proporzioni delle masse dell'imbarcazione a idrogeno a vuoto da simulazione.

Gli altri dati in input vengono estrapolati dalle simulazioni del modello dinamico sviluppato in questo progetto di tesi. Si identificano, per una condizione in regime di volo stabile indisturbato:

- la velocità in regime di volo dell'imbarcazione;
- la forza propulsiva di picco fornita dalla motorizzazione, Trust a vuoto;
- la distanza selezionata di una tratta di 10 km, per simulare uno scenario base come la tratta Venezia-Venezia Aeroporto, stressata negli scenari successivi;
- massa a vuoto dell'imbarcazione, presa dal modello dinamico sviluppato;
- massa totale impostata per il caso base di 800 kg, poi stressata nei casi successivi.

INPUT		
Distanza	10	km
massa a vuoto	500	kg
massa totale	800	kg
Trust a vuoto	3500	N
velocità	16	m/s

Tabella 5.2 Dati di input del tool di valutazione da simulazione.

Il dimensionamento della motorizzazione viene effettuato sul valore identificato nella simulazione, della massima potenza erogata dal motore, motivo per il quale in questo tool di valutazione si considerano i valori di potenza di picco e non potenze allo stazionario.

Per identificare la potenza richiesta da un'imbarcazione foilante in grado di mantenere delle condizioni di volo stabili, bisogna identificare il suo legame con la massa dell'imbarcazione, la resistenza idrodinamica sui FOILS e l'efficienza del sistema propulsivo (40% per l'idrogeno e 70% per l'elettrico [19]) attraverso la seguente formula:

$$P = 2 \frac{C_D}{C_L} \frac{mgV_x}{\eta}$$

Per valutare l'impatto dei disturbi esterni sul sistema si lanciano delle simulazioni per ogni scenario e si valutano le variazioni di potenza sviluppata dalla propulsione e delle condizioni di equilibrio del sistema. Si considerano pertanto i nuovi valori di forza propulsiva e di velocità dell'imbarcazione nelle nuove condizioni di equilibrio di sistema disturbato, e si valuta la potenza sviluppata con la seguente formula:

$$P = T \cdot V_x$$

Il consumo calcolato per dimensionare le motorizzazioni tiene in considerazione l'autonomia richiesta in relazione alla distanza, come mostra la seguente formula:

$$\text{Consumo}[kWh] = \frac{\text{Distanza [m]}}{\text{Velocità [m/s]}} \cdot \frac{1}{3600} \cdot \frac{\text{Potenza [W]}}{1000}$$

Per il calcolo delle masse dedicate alle motorizzazioni, sono state seguite le proporzioni da simulazione per la motorizzazione a idrogeno, mentre per le motorizzazioni elettriche è stato effettuato uno studio di mercato per ricavare una proporzionalità tra i consumi richiesti e le batterie adatte a ioni di litio [20] [21] [22]. La proporzione impostata tiene conto della densità energetica delle batterie agli ioni di litio NMC/NCA ad alta densità, usate tipicamente per applicazioni e nautiche, pari a 160 Wh/kg. Si ottiene quindi il peso dividendo il valore del consumo calcolato per il valore della densità media precedentemente indicata. Dallo stesso studio sono state ricavate le proporzioni volumetriche per entrambe le tipologie di motorizzazione.

5.3 Descrizione degli scenari

- Caso 1 – Scenario Base

In questo scenario si vuole identificare una linea guida con cui confrontare le variazioni degli scenari successivi. I dati di input di questo scenario sono quelli descritti nelle tabelle precedenti.

Si calcola la potenza in kW, con la prima formula indicata, ed il consumo per l'autonomia e la velocità identificata dalla simulazione.

Sono calcolate le masse in gioco nel caso dell'idrogeno, che seguono le proporzioni definite in tabella, considerando come fissi i dati di peso pari a 300 kg per lo scafo, 100 kg per la massa dei FOILS e 25 kg per la massa della trasmissione del motore.

Per la motorizzazione ad idrogeno, seguendo la proporzione, si ottengono 75 kg di peso dedicato alla Fuel Cell. Per l'autonomia di 10km l'idrogeno stoccato pesa 2 kg, compreso del peso della bombola di stoccaggio per un totale di 77 kg per la massa della motorizzazione ad idrogeno.

Per il dimensionamento della motorizzazione elettrica si è individuata una batteria commerciale agli ioni litio a partire dal dato di consumo calcolato pari a 6 kWh, che corrisponde a una batteria di 40 kg e 33 L di volume.

Tenendo conto di un peso medio di un passeggero di 80kg, per sottrazione dalla massa totale di 800 kg, si è calcolato il numero dei passeggeri trasportabili dall'imbarcazione.

Questa procedura di calcolo delle masse e del numero di passeggeri verrà usata per tutti gli scenari mentendo fissi i dati di massa precedentemente identificati come costanti.

- Caso 2 – Scenario Disturbo vento contrario 48 nodi

In questo scenario si è perturbato il sistema e si sono identificate le nuove condizioni di equilibrio. Dai dati della simulazione si è calcolata la potenza di picco richiesta, ottenuta da una forza propulsiva di picco di 5000 N, diversa dal valore dello scenario base di 3500 N, e con una velocità a regime di poco inferiore rispetto al caso indisturbato. Consumo, numero di passeggeri trasportabili e massa della motorizzazione sono stati calcolati con la stessa procedura del caso base. In questo caso, avendo potenze e consumi maggiori si è dovuto identificare motorizzazioni commerciali differenti rispetto a quelle del caso base, risultanti in volumi e masse superiori. Per il motore a idrogeno si hanno 95 kg di Fuel Cell e 2 kg dedicati allo storage.

- Caso 3 – Scenario di Stress dell'Autonomia (50 km)

In questo scenario è stata aumentata soltanto la distanza di percorrenza da 10 km a 50 km, mantenendo tutti gli altri dati di input costanti. Le procedure indicate nel caso base sono state nuovamente applicate, arrivando alle stesse potenze massime ma a consumi molto più elevati. Questo ha implicato l'identificazione di nuove motorizzazioni commerciali che soddisfacessero i consumi richiesti con masse e volumi più elevati. Per il motore a idrogeno si hanno 75 kg di Fuel Cell e 10 kg dedicati allo storage.

- Caso 4 – Scenario stress di Potenza

In questo scenario si è simulata l'aggiunta all'imbarcazione di un peso di 200 kg come disturbo, per vedere come varia il consumo portando la massa totale a 1000 kg.

Si nota da simulazione una diminuzione della velocità e un aumento della Trust, che portano i consumi a dei valori simili allo scenario di disturbo del Caso 2. I valori di potenza e consumo vengono ricalcolati come nello scenario base, ma le motorizzazioni commerciali individuate corrispondenti ai consumi richiesti sono le stesse del Caso 2. Per il motore a idrogeno si hanno 92 kg di Fuel Cell e 2 kg dedicati allo storage.

- Caso 5 – Autonomia simile a Candela (90 km)

Si è voluto infine valutare un caso simile alle condizioni dell'imbarcazione commerciale Candela C-7, non solo per fare un confronto col caso preso in studio nella tesi ma anche per validare il Tool stesso. Il confronto porta a dei valori molto simili riportati nella Tabella 5.4, dimostrando che il Tool è coerente e che tutti i risultati derivanti sono veritieri. Le procedure di calcolo dei risultati sono le medesime del caso base, aumentando unicamente l'autonomia a 90 km, il che influisce principalmente sui consumi. La motorizzazione a idrogeno mantiene un peso di 75 kg, ma vi sono 20 kg dedicati allo storage, mentre per la batteria a litio si è trovato un motore commerciale da 340 kg, lo stesso usato nell'applicazione commerciale di riferimento.

5.4 Risultati della valutazione

Tutti i risultati calcolati come precedentemente descritto sono riportati nelle seguenti tabelle, con l'aggiunta di una valutazione di costo che non è da sottovalutare per la scelta della motorizzazione. Per la valutazione dei costi si è tenuto conto dei valori medi di mercato di 300 €/kW di potenza per motorizzazione ad idrogeno e di 300 €/kWh di consumo per motorizzazione elettrica.

CASO		distanza [km]	massa totale imbarcazione [kg]	Potenza massima [kW]		consumo [kWh]	
				hy	el	hy	el
1	Base	10	800	63	36	11	6
2	Disturbo (vento contrario 48 nod)	10	800	80	46	14	8
3	Stress autonomia	50	800	63	36	55	31
4	Stress potenza	10	1000	77	44	14	8
5	Autonomia simile a Candela	90	800	63	36	98	56

CASO		numero passeggeri trasportabili		massa motorizzazione [kg]		costi [€]		Volume motorizzazione [L]	
		hy	el	PEM + H2	Batteria	hy	el	hy	el
1	Base	3,7	4,2	77	40	18900	1800	154	33
2	Disturbo (vento contrario 48 nod)	3,5	4,1	97	50	24000	2400	194	42
3	Stress autonomia	4	2	85	190	18900	9300	170	158
4	Stress potenza	3,5	4,1	94	50	23100	2400	188	42
5	Autonomia simile a Candela	4	0	95	340	18900	16800	190	283

Tabella 5.3 Risultati del tool per i diversi scenari.

Come si può notare, e ci si auspicava, per basse autonomie prevale la motorizzazione elettrica convenendo sia sul numero di passeggeri trasportabili sia economicamente. Mentre sulle lunghe distanze conviene maggiormente un motore ad idrogeno in termini di peso e volume, e quindi si osserva il vantaggio anche nel numero di passeggeri trasportabili. Per autonomie di 90 km, notiamo la poca differenza anche nel costo delle due applicazioni, il che rende nettamente vincente la scelta dell'idrogeno.

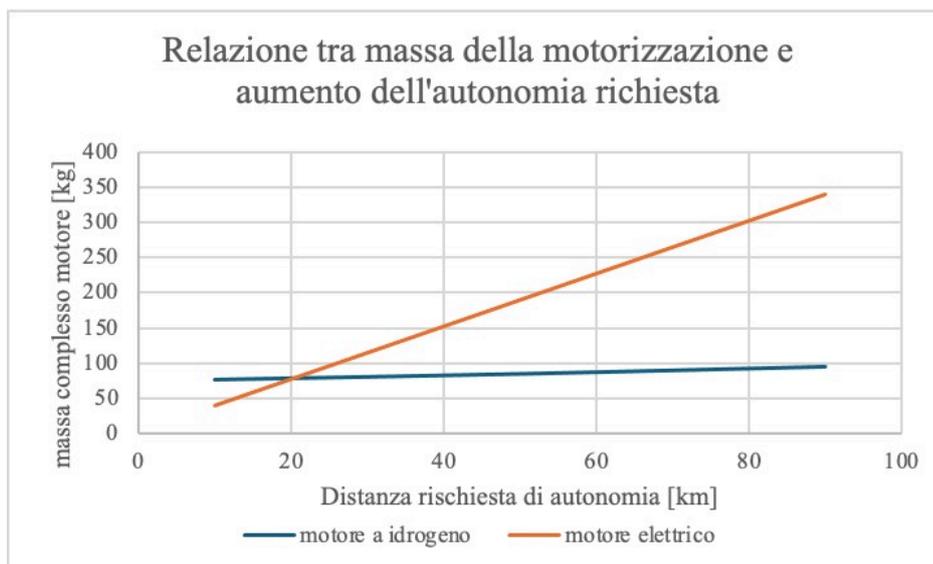


Figura 5.2 Relazione tra massa del motore e autonomia.

Dal grafico in Figura 5.2 si evince che la massa del motore ad idrogeno rimane pressoché costante al crescere dell'autonomia, mentre la massa del motore elettrico cresce in modo significativo a causa dell'aumento di peso dovuto al pacco batterie. Si identifica il trade off per il cambio di convenienza da motorizzazione elettrica a idrogeno dopo i 20 km di autonomia, rimanendo però economicamente sconveniente fino ai 90 km di autonomia, dove i costi diventano quasi equivalenti.

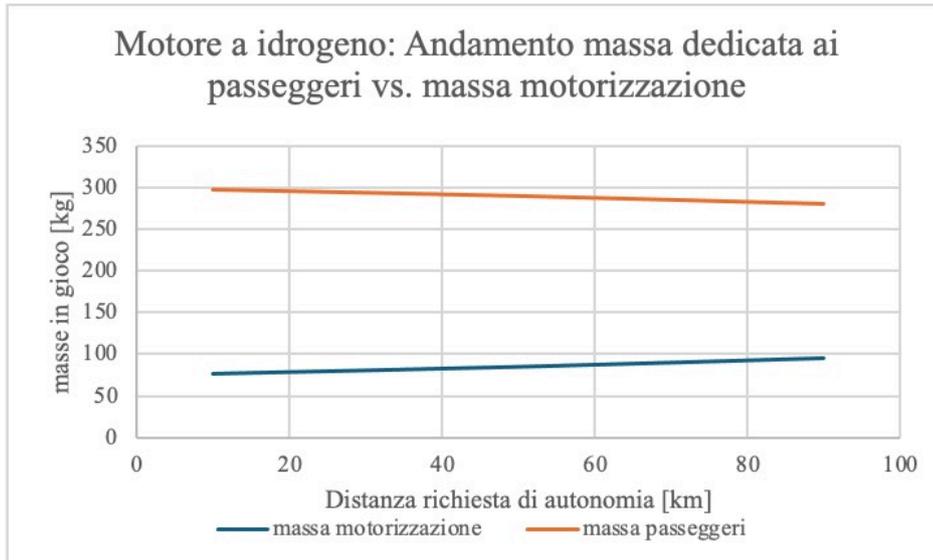


Figura 5.3 Relazione tra massa dei passeggeri e massa del motore nel caso del motore a idrogeno.

Per il motore ad idrogeno, così come rimane costante la massa della motorizzazione, rimane circa costante anche la massa dedicata ai passeggeri, riuscendone a trasportare sempre circa quattro.

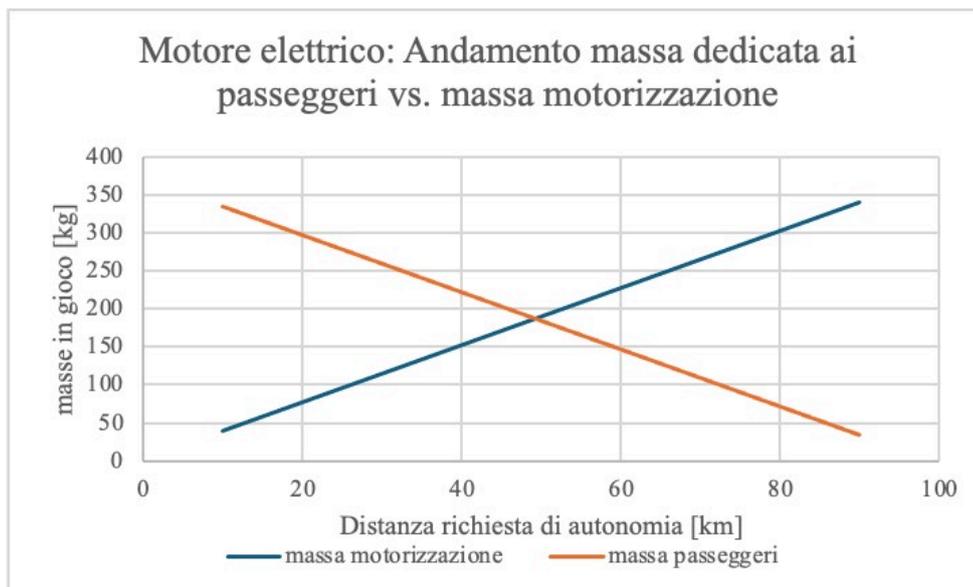


Figura 5.4 Relazione tra massa dei passeggeri e massa del motore nel caso del motore elettrico.

Per la motorizzazione elettrica invece, crescendo la massa della batteria, decresce la massa dedicata ai passeggeri che nel caso di un'autonomia di 90 km risulta azzerarsi. Questo dovuto all'imposizione di massa totale, limite impostato a priori, pari a 800 kg.

Confronto	distanza [km]	massa totale imbarcazione [kg]	Potenza massima [kW]	consumo [kWh]	numero passeggeri trasportabili	massa motorizzazione [kg]	Volume motorizzazione [L]
Autonomia simile a Candela	90	800	36	56	0	340	283
CANDELA C7	93	1300	55	60	6	340	290

Tabella 5.4 Risultati dell'ultimo scenario a maggiore autonomia a confronto con Candela C7 [1].

Dal confronto con il modello commerciale Candela C7 [1] nel caso di autonomia a 90 km si evince che tutti i valori sono coerenti, aspetto che valida il nostro tool di valutazione. Gli aspetti che differiscono sono il peso totale della barca, il numero di passeggeri e la potenza massima, dimostrando, però, che serve portare il peso totale della barca a 1300 kg per trasportare 6 passeggeri senza variazioni di consumi, ma con un ovvio incremento di potenza di picco. Il valore più elevato della potenza massima richiesta è dovuto al maggior peso totale, così come anche la possibilità di trasporto dei passeggeri, in virtù di una massa della motorizzazione praticamente uguale, che nel nostro caso simulato occupa una percentuale più elevata del peso totale rispetto a Candela C7. I consumi rimangono coerenti tra loro e coerenti con l'autonomia, molto simile, richiesta. Questa dipendenza si evince anche dal Caso 4 in cui un aumento di peso di 200 kg dell'imbarcazione non ha un significativo impatto sui consumi e quindi sul dimensionamento dei motori.

6 Conclusioni e sviluppi futuri

Lo sviluppo del modello dinamico per l'imbarcazione foilante in ambiente MATLAB Simulink è stato possibile attraverso lo studio del software e dei toolbox in esso contenuti, come il toolbox Aerospace, il FuzzyLogicDesigner, gli strumenti di taratura PID ed altri blocchi funzionali del software. La fisica correlata alla progettazione di imbarcazioni foilanti è stata indagata in modo approfondito, tenendo in considerazione gli aspetti aerodinamici e fluidodinamici dello scafo e delle appendici alari costituenti gli hydrofoil che ne permettono il volo.

Attraverso lo sviluppo di controllori tradizionali PID e controllori regolati tramite logica FUZZY, è stato possibile regolare il sistema e identificare la sua dinamica del moto attraverso la risoluzione delle equazioni di equilibrio in ogni fase di navigazione, dal decollo al volo stabile. L'aspetto fondamentale della progettazione di questi sistemi risiede nell'implementazione delle leggi di controllo di volo, sistemi per i quali si impostano degli obiettivi stringenti in termini di comfort e prestazioni. Il confronto del sistema controllato dai due regolatori mette in luce i pregi della logica di controllo FUZZY. Questo si è rivelato più efficace in tutte le fasi del moto del sistema, anche negli scenari perturbati con disturbi di carico, vento contrario o moto ondosso, dimostrandosi più robusto e stabile dei controllori PID. Infatti, i risultati hanno dimostrato che il controllore FUZZY permette una gestione ottimizzata della quota, del beccheggio, della velocità di avanzamento e di sollevamento, adattandosi ai disturbi esterni e garantendo il raggiungimento degli obiettivi di quota e assetto. Le accelerazioni identificate rientrano nei range di comfort e risultano sempre paragonabili o migliori rispetto alle accelerazioni identificate per i controllori PID. Come ci si aspettava, il controllore FUZZY gestisce efficacemente le non linearità del sistema simulato; infatti, è capace di adattarsi al meglio alle condizioni a cui è sottoposto risultando più robusto e stabile dei classici controlli lineari. Questo grazie alla struttura del controllore che, attraverso la reinterpretazione delle variabili di ingresso e uscita, a cui sono associati dei gradi di attivazione, e l'impostazione di regole linguistiche, permette di creare delle leggi di controllo complesse, definite in uno spazio tridimensionale e facilmente modellabili e adattabili al sistema, che, come in questo caso, può presentare forti non linearità.

In ultima analisi, per sfruttare i parametri ottenuti dalle simulazioni del modello dinamico ci si è posti l'obiettivo di identificare un dimensionamento qualitativo di due motorizzazioni differenti. Partendo da uno scenario simulato con una motorizzazione ad idrogeno, mantenendo costanti i valori in massa di scafo, appendici e trasmissione, si dimensiona un pacco batterie equivalente, e si identificano le masse in gioco con l'obiettivo di valutare il trade off in termini di peso e volume tra le due applicazioni, evidenziando il numero di passeggeri trasportabili come uno dei fattori discriminanti del confronto. Per gli scenari di stress di potenza, autonomia e disturbo a vento contrario, applicati alle due motorizzazioni a confronto, si è evidenziato come per basse autonomie siano equivalenti in termini di carico trasportabile, con una convenienza dell'applicazione elettrica, soprattutto economica. Con l'aumentare dell'autonomia la

convenienza della motorizzazione ad idrogeno porta con sé il vantaggio di una minore variazione in peso e in volume. Rispetto alla forte dipendenza della motorizzazione elettrica dal peso del pacco batterie, l'applicazione ad idrogeno lascia a disposizione un carico dedicato ai passeggeri maggiore. Il confronto con il prodotto commerciale Candela evidenzia che i risultati di dimensionamento sono realistici, a fronte di una differenza di massa totale che nel caso in studio è stata imposta come limite per rimanere coerenti con la massa a vuoto imposta nella simulazione.

Questo modello sviluppato mette le basi per la progettazione di sistemi di controllo adattativi in grado di simulare le dinamiche complesse delle imbarcazioni foilanti, ed indaga la convenienza dell'adozione di motorizzazioni ad idrogeno. Infatti, future implementazioni possono riguardare la combinazione dei due controllori come visto in letteratura, con l'obiettivo di utilizzare il controllore FUZZY per impostare in modo adattivo i guadagni dei controllori PID. Inoltre, la progettazione dei controllori FUZZY può prevedere un'integrazione di più variabili di stato in ingresso, rendendo possibile la creazione di un controllore che gestisca in modo combinato la dinamica longitudinale e la dinamica latero direzionale, sostituendo l'attuale adozione dei controllori PID utilizzati per quest'ultima in questo lavoro di tesi.

7 Riferimenti

- [1]. <https://candela.com/leisure-boats/candela-c-7/>
- [2]. <https://powerboat.world/news/239432/Candela-C-7-wins-electric-speedboat-race-in-Monaco>
- [3]. <https://energyboatchallenge.com/>
- [4]. <http://candela.com/leisure-boats/candela-c-8/>
- [5]. <https://powerboat.world/news/276728/First-Candela-C-8-Polestar-Edition-delivered>
- [6]. <https://candela.com/pro-series/p-12-shuttle/>
- [7]. <https://powerboat.world/news/280939/Candela-P-12-Nova-takes-off-in-Stockholm>
- [8]. <https://sailingteam.polito.it/>
- [9]. Thor I. Fossen; L. McCue, Handbook of Marine Craft Hydrodynamics and Motion Control, First Edition. Trondheim, Norway, Published 2011 by John Wiley & Sons Ltd.
- [10]. N. Patterson, Development of a Six Degree of Freedom Velocity Prediction Program for the foiling AC50 Catamaran and AC75 Monohull. Australian Maritime College, University of Tasmania, 2021.
- [11]. S. Bucaria, Optimization of a Hydrofoiling International Moth design and performance investigations with a 6 DOF dynamic model. Rel. Giuliana Mattiazzo, Stephen R. Turnock. Politecnico di Torino, Corso di laurea magistrale in Ingegneria Aerospaziale, 2022.
- [12]. M. Touw, Prediction of the longitudinal stability and motions of a hydrofoil ship with a suspension system between the wings and the hull using a state-space model, Master of Science at the Delft University of Technology, 2020.
- [13]. A. Lundgren, Flight Control System for a Hydrofoil Boat, Master's thesis in Systems, Control and Mechatronics, department of mechanics and maritime sciences, Chalmers university of technology, Gothenburg, Sweden, 2023.
- [14]. Y. Ma, Q. Zhu and Z. Yang, "FUZZY Control of Fast Catamaran Ride Control System," 2018 37th Chinese Control Conference (CCC), Wuhan, China, 2018.
- [15]. F. Colombo; V. Viktorov, Automazione dei sistemi meccanici: corso di base, quinta edizione, CLUT, 2018.
- [16]. W. Pedrycz; F. Gomide, FUZZY Systems Engineering Toward Human-Centric Computing, Wiley-IEEE Press, 2007.
- [17]. UNI ISO 2631-1:2024; Vibrazioni meccaniche e urti – Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero.
- [18]. <https://www.yachtdigest.com/candela-seven/>
- [19]. Ö. F. Günaydın; S. Topçu; A. Aksoy, Hydrogen fuel cell vehicles: Overview and current status of hydrogen mobility, International Journal of Hydrogen Energy, Bursa Uludag University, Industrial Engineering Department, Bursa, Türkiye, 2025.
- [20]. <https://www.solarsoft.it/batterie/lgb/eh048126p3s1>
- [21]. <https://www.solarsoft.it/batterie/lgb/eh048189p3s1>
- [22]. <https://heliosmarine.io/product/marine-battery-systems/>