UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI GENOVA

SCUOLA POLITECNICA

DITEN

Dipartimento di Ingegneria Navale, Elettrica,
Elettronica e delle Telecomunicazioni

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN
INGEGNERIA NAVALE

MODELLI MATEMATICI PER LA SIMULAZIONE REAL TIME DI SISTEMI DI POSIZIONAMENTO DINAMICO PER APPLICAZIONI DI TRAINING

Relatrice:
Prof.ssa Silvia Donnarumma

Candidato:
Mattia MORINI

Anno Accademico 2024/2025

Indice

1 Introduzione **4**
1.1 Posizionamento dinamico 4
1.2 Schema di funzionamento di un sistema DP 6
1.3 Applicazioni del sistema di posizionamento dinamico 7

2 Stato dell'arte **8**
2.1 Modello nave 8
2.2 Disturbi ambientali 11
2.2.1 Forze e momenti generati dal vento 11
2.2.2 Forze e momenti generati dalla corrente 13
2.2.3 Forze e momenti generati dalle onde 14
2.3 Sistema di controllo 14
2.3.1 Osservatore dello stato 14
2.3.2 Controllore 15
2.4 Allocazione della spinta 17
2.4.1 Tipologie di attuatori 18
2.4.2 Modellazione degli attuatori 21
2.4.3 Ottimizzazione 21
2.5 Classificazione e modalità operative 22

3 Algoritmi di risoluzione per l'allocazione della spinta **24**
3.1 Imbarcazione considerata e dati disponibili 25
3.1.1 Configurazione propulsiva 26
3.2 Problema di allocazione della spinta 26
3.2.1 Forze ambientali 26
3.2.2 Allocazione della spinta 29
3.3 Metodi di allocazione implementati 31
3.3.1 Ottimizzazione vincolata 31
3.3.2 Assi fissi 32
3.3.3 Direzione fissata 36
3.4 Scenari operativi analizzati 36
3.4.1 Caso statico 38
3.4.2 Caso di analisi direzionale 45
3.4.3 Caso realistico 48

4 Interazione elica-elica **88**
4.1 Saturazione della spinta 89
4.1.1 Risultati caso statico con direzione fissata e saturazione della spinta 90
4.1.2 Risultati caso realistico con direzione fissata e saturazione della spinta 91
4.2 Disassamento delle spinte 93
4.2.1 Risultati caso statico con ottimizzazione vincolata e disassamento della spinta 94
4.2.2 Risultati caso realistico con ottimizzazione vincolata e disassamento della spinta 95

5 Simulazioni **99**

6 Conclusioni **104**

Capitolo 1

Introduzione

Nel campo dell'ingegneria navale, l'utilizzo dei sistemi di Posizionamento Dinamico (DP) è diventato sempre più diffuso e rilevante nel corso degli anni, specialmente in ambiti operativi come quelli dell'*offshore*. L'evoluzione tecnologica ha reso possibile non solo il perfezionamento dei sistemi di controllo a bordo, ma anche lo sviluppo di simulatori in grado di riprodurne il comportamento in tempo reale.

In questo contesto di simulazione, una fase molto delicata, che deve essere eseguita rapidamente e in modo affidabile, riguarda la cosiddetta allocazione della spinta, ossia la conversione di forze e momenti richiesti in spinte che ciascun propulsore deve fornire, rispettando i limiti fisici e le caratteristiche meccaniche dell'unità navale.

Lo scopo di questo elaborato è quello di sviluppare algoritmi per simulatori di posizionamento dinamico per applicazioni di training. Per ottenere ciò, si devono calcolare le forze ambientali dovute a vento, onde e corrente,per poi passare alla risoluzione del problema di allocazione della spinta che permette di ottenere le spinte che ogni propulsore deve fornire per vincere i disturbi.

Dopo un'introduzione generale riguardante i sistemi di posizionamento dinamico, verranno analizzati alcuni casi di studio, risolti utilizzando diverse tecniche di allocazione della spinta, valutandone l'efficacia sia dal punto di vista tecnico che da quello operativo.

L'obiettivo è identificare soluzioni che garantiscano al contempo precisione dei risultati e rapidità di calcolo, compatibili con le esigenze delle simulazioni in tempo reale.

In conclusione, introducendo la fisica del problema, si sviluperanno delle simulazioni della traiettoria della nave.

1.1 Posizionamento dinamico

Un'unità navale dotata di posizionamento dinamico è una nave in grado di mantenere la propria posizione e il proprio orientamento (in un punto fisso oppure seguendo una traiettoria predefinita) sotto l'effetto di disturbi ambientali esterni (forze di vento, onde e corrente), utilizzando esclusivamente i suoi propulsori attivi, senza dover ricorrere all'utilizzo di alcun sistema di ancoraggio.

I primi sistemi di posizionamento dinamico sono stati sviluppati e introdotti negli anni '60 in concomitanza con il continuo sviluppo dell'industria petrolifera offshore che richiedeva sistemi alternativi a quelli di ancoraggio e che si muoveva sempre più verso zone distanti dalle coste e con fondali molto profondi. Nonostante i principi di base siano rimasti sempre gli stessi, negli ultimi anni la crescita delle tecnologie ha portato ad un forte sviluppo dei sistemi di DP, andando ben oltre all'industria petrolifera e raggiungendo livelli di accuratezza sempre più elevati.

I sistemi di DP sono stati storicamente impiegati per dotare un mezzo navale di elevate capacità di controllo dei moti a basse velocità. Con il tempo sono state sviluppate funzionalità specializzate, come ad esempio per operazioni di posa di cavi e condotte oppure per l'impiego di veicoli subacquei comandati a distanza (ROV). Una nave per poter fornire prestazioni di DP affidabili deve combinare in modo opportuno potenza, manovrabilità e controllo computerizzato: questo significa che all'interno di questi sistemi rientrino tutti i sistemi di bordo che, opportunamente integrati, consentano al mezzo di mantenere la propria posizione. In particolare i sistemi di posizionamento dinamico comprendono i seguenti sistemi:

- sistemi di generazione di potenza che comprendono tutti gli impianti ed i componenti necessari all'alimentazione del sistema DP, come motori primi con i relativi sistemi ausiliari, generatori, quadri elettrici, sistemi di distribuzione elettrica;

- impianto di propulsione che comprende tutti i componenti e i sistemi necessari per fornire le spinte nelle opportune direzioni al sistema DP tra cui propulsori e i vari sistemi ausiliari, eliche principali e timoni;

- sistema di controllo DP che comprende tutti gli impianti ed i componenti necessari per lo stazionamento del mezzo tra i quali computer di controllo e joystick, sensori (giroscopi, sensori del vento), sistemi di riferimento della posizione, sistemi di visualizzazione (pannello operatore).

Oltre a tutto ciò, all'interno del sistema DP, generalmente, rientra anche la presenza di un operatore che interviene per assegnare la posizione e l'angolo di prua desiderato.

1.2 Schema di funzionamento di un sistema DP

Il layout del sistema di posizionamento dinamico è implementato come nello schema a blocchi presente in Figura 1.1.

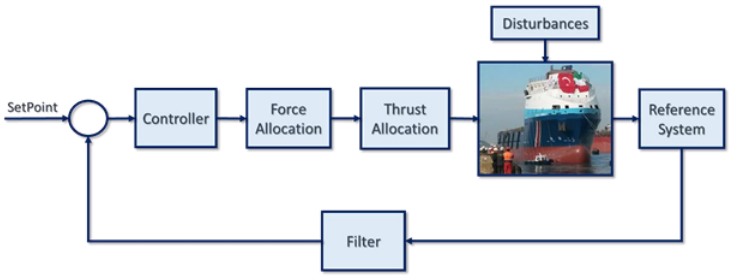


Figura 1.1: *Layout del sistema di posizionamento dinamico*

Esso si compone di diverse parti che vengono brevemente illustrate di seguito.

Osservatore dello stato

Lo scopo principale di questo blocco è quello di fornire una stima della posizione, dell'orientamento e della velocità della nave a partire dai dati provenienti dai sensori di bordo, effettuando un'operazione di filtraggio. Per questo motivo questa componente del sistema è implementata attraverso dei filtri di diverso tipo come filtri passabasso, filtri *notch* o filtri di Kalman, anche se nel tempo sono state sviluppate e proposte altre soluzioni.

Controllore

Questa componente ha l'obiettivo di generare un vettore di forze e momenti che devono essere prodotti dagli attuatori per mantenere l'orientamento e la posizione desiderati. Il controllore di posizionamento dinamico calcola questo vettore, utilizzando come ingresso l'errore che si ha tra il segnale di riferimento misurato e quello desiderato. Lo scopo è restituire dei valori di setpoint da inviare agli attuatori in modo da minimizzare l'errore che si ha tra il desiderato e il misurato.

Allocazione

Questo blocco si occupa di trasformare le forze e i momenti richiesti dal controllore in forze e momenti richiesti per ciascuno degli s attuatori presenti sulla nave. In particolare, sia n il numero di gradi di libertà del modello della nave, si ha che:

- Se $s > n$ il problema di allocazione è detto *overactuated control problem*;
- Se $s < n$ il problema di allocazione è detto *underactuated control problem*.

A seconda del tipo e del numero di propulsori presenti a bordo, il problema può essere affrontato con diverse strategie, sebbene l'approccio più diffuso preveda la risoluzione di un problema di ottimizzazione.

1.3 Applicazioni del sistema di posizionamento dinamico

I sistemi di posizionamento dinamico (DP) rappresentano una tecnologia evolutiva cruciale per numerose operazioni in mare che richiedono molta precisione nel mantenere la posizione e l'orientamento desiderati. Le principali motivazioni che hanno portato allo sviluppo e all'adozione dei sistemi di posizionamento dinamico sono:

- sicurezza delle operazioni *offshore* durante attività critiche come trivellazioni, installazioni di condotte o manutenzioni sottomarine in cui è necessario mantenere la nave stabile per evitare di causare danni a strutture, mezzi o persone;
- sostituzione dei sistemi di ancoraggio tradizionali in acque profonde o su fondali instabili in cui l'uso di ancore risulta complicato o inefficiente; il sistema di posizionamento dinamico consente operazioni dove l'ancoraggio sarebbe praticamente impossibile;
- flessibilità operativa dal momento che questo sistema permette movimenti rapidi e precisi senza la necessità di sistemi di ancoraggio o di ormeggio, aumentando quindi l'efficienza delle varie unità navali;
- applicazioni in ambienti complessi, come ad esempio per operazioni in prossimità di altre unità galleggianti o infrastrutture, nei quali il sistema DP consente un posizionamento sicuro e controllato, riducendo tutti i rischi possibili.

Capitolo 2

Stato dell'arte

In questo capitolo si analizzano in modo più dettagliato ed accurato i vari elementi che compongono e contribuiscono al funzionamento corretto del sistema di posizionamento dinamico.

2.1 Modello nave

Quando si deve parlare dei moti di una nave è necessario definire dei sistemi di riferimento. In particolare nel caso dei sistemi di posizionamento dinamico è utile definire due diversi sistemi di riferimento:

- il sistema di riferimento inerziale, fisso con la Terra, *NED* (*North-East-Down*) individuato dalla base $\{\Omega, \underline{n}_1, \underline{n}_2, \underline{n}_3\}$ dove il versore $\underline{n}_1$ è diretto verso nord, $\underline{n}_2$ verso est e $\underline{n}_3$ verso il basso perpendicolarmente rispetto alla superficie della Terra. L'origine del sistema di riferimento è posta sulla superficie libera media individuante l'interfaccia aria-acqua;

- il sistema di riferimento solidale con il corpo definito *Body-fixed* individuato dalla base $\{O, \underline{b}_1, \underline{b}_2, \underline{b}_3\}$. L'origine del sistema di riferimento è posta sulla superficie libera e la sua posizione è individuata dalle seguenti coordinate $O = (LPP/2, 0, zwl)$ rispetto alla perpendicolare addietro, al piano di simmetria e alla linea di chiglia dove *zwl* rappresenta l'altezza del galleggiamento di progetto. In particolare l'angolo tra il nord geografico (individuato dal versore $\underline{n}_1$) e la prora della nave (individuata dal versore $\underline{b}_1$) è l'angolo di rotta ψ. In tale riferimento vengono descritti i moti, le velocità, le accelerazioni della nave e le forze agenti su di essa (spinta dei propulsori, resistenza al moto della nave, ecc.).

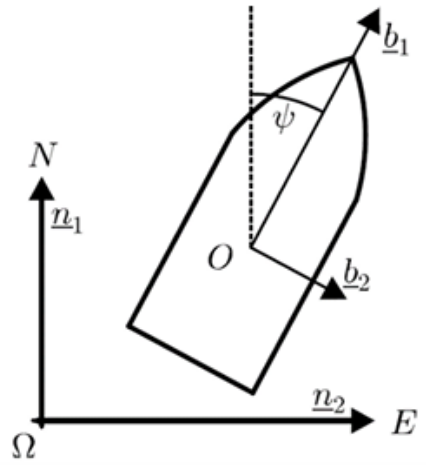


Figura 2.1: *Sistemi di riferimento*

Sulla base delle terne precedentemente definite è possibile esprimere la posizione, l'orientamento e la velocità della nave, considerando quest'ultima un corpo rigido e il suo dislocamento costante, rispetto ai totali sei gradi di libertà. Solitamente quando si parla di posizionamento dinamico, si analizzano solo tre dei sei gradi di libertà della nave, in particolare il moto di avanzo (*surge*, traslazione longitudinale), di deriva (*sway*, traslazione laterale) e di imbardata (*yaw*, rotazione attorno all'asse verticale z), essendo spesso la funzione principale del DP quella di controllare automaticamente questi tre moti. In alcuni casi specifici si considera un ulteriore grado di libertà che è rappresentato dal moto di rollio (*roll*, rotazione attorno all'asse longitudinale x).

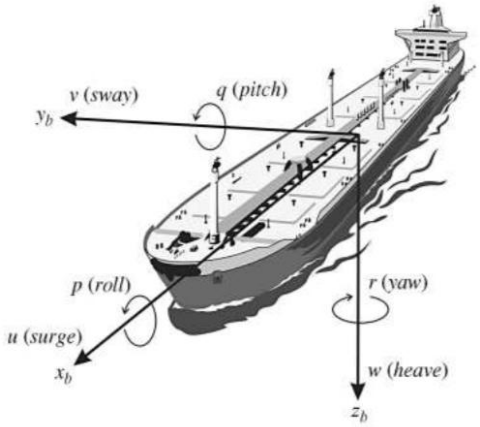


Figura 2.2: *Moti della nave*

In particolare la posizione, l'orientamento, la velocità della nave e le forze agenti su di essa rispetto ai tre gradi di libertà considerati vengono definiti utilizzando le seguenti matrici:

- $\eta = \begin{bmatrix} x & y & \psi \end{bmatrix}^T$ matrice posizione ed orientamento della nave rispetto al sistema di riferimento inerziale;
- $\nu = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T$ matrice delle velocità lineari ed angolari rispetto al sistema di riferimento solidale con il corpo;
- $\tau = \begin{bmatrix} X & Y & N \end{bmatrix}^T$ matrice di forze e momenti agenti sull'imbarcazione rispetto al sistema di riferimento solidale con il corpo.

Le equazioni della cinematica che si ottengono considerando solo i tre gradi di libertà descritti e trascurando la matrice di *Coriolis* $C = C_{rb} + C_A$, vengono definite nel seguente modo.

$$\dot{\eta} = R(\psi)\nu$$

$$M\dot{\nu} + D(\nu_r) = \tau_{\text{wind}} + \tau_{\text{wave2}} + \tau_{\text{current}} + \tau_{\text{moor}} + \tau_{\text{ice}} + \tau_{\text{thr}}$$

dove ν_r è la matrice delle velocità relative tra la nave e la corrente; $R(\psi)$ è la matrice di rotazione che mette in relazione i due sistemi di riferimento ed è definita come

$$R(\psi) = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad ;$$

M è la matrice che contiene i contenuti inerziali

$$M = \begin{bmatrix} m - \dot{X}_u & 0 & 0 \\ 0 & m - \dot{Y}_v & mx_g - \dot{Y}_r \\ 0 & mx_g - \dot{Y}_r & I_z - \dot{N}_r \end{bmatrix}$$

con m il dislocamento della nave, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $N_{\dot{r}}$ sono le masse aggiunte, x_g è la coordinata longitudinale del baricentro rispetto al sistema di riferimento body-fized e I_z è l'inerzia; D è la matrice che contiente le componenti degli effetti idrodinamici dovuti all'interazione della carena con l'acqua; τ_{wind}, τ_{wave2}, $\tau_{current}$ rappresentano rispettivamente i vettori di forze e momenti generati da vento, onde di secondo ordine e correnti; τ_{ice} e τ_{moor} rappresentano i vettori dei carichi generati dall'interazione con ghiaccio e sistema di ancoraggio; τ_{thr} rappresenta il vettore delle forze e dei momenti prodotti dal sistema di attuatori sulla base dell'uscita del controllore.

2.2 Disturbi ambientali

Come descritto precedentemente, è necessario studiare anche i disturbi ambientali che agiscono sulla nave e che sono descritti da forze e momenti generati da:

- onde;
- vento;
- corrente.

In particolare, questo passaggio risulta essere molto importante per il sistema di posizionamento dinamico perché uno degli scopi principali risulta essere quello di resistere a queste forze e momenti generati da disturbi esterni per poter essere in grado di mantenere la posizione e l'orientamento desiderati. Le forze totali X_{env}, Y_{env} e il momento N_{env} vengono valutate sotto l'ipotesi del principio di sovrapposizione lineare come segue.

$$\begin{cases} X_{\text{env}} = X_{\text{wind}} + X_{\text{wave}} + X_{\text{current}} \\ Y_{\text{env}} = Y_{\text{wind}} + Y_{\text{wave}} + Y_{\text{current}} \\ N_{\text{env}} = N_{\text{wind}} + N_{\text{wave}} + N_{\text{current}} \end{cases}$$

Queste forze e momenti possono essere calcolati utilizzando formule che derivano da una combinazione di approcci teorici, sperimentali (prove in galleria del vento o in vasca navale) e numerici (CFD) oppure utilizzando formule che vengono fornite dai regolamenti in funzione delle dimensioni principali della nave e delle caratteristiche dei propulsori.

2.2.1 Forze e momenti generati dal vento

Il vento viene definito come un movimento di aria rispetto alla superficie della Terra. Si definiscono V_w e γ_w rispettivamente la velocità e l'angolo di attacco del vento, ovvero l'angolo che si forma tra la direzione del vento e la prua della nave come mostrato in figura 2.3.

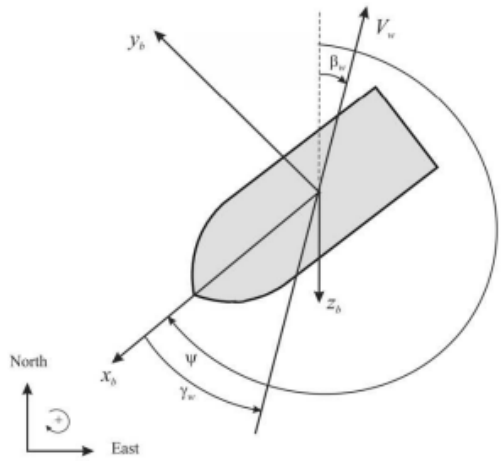


Figura 2.3: *Velocità e angolo di attacco del vento*

Le forze e i momenti generati dal vento possono essere espressi dalle seguenti relazioni derivanti dalla meccanica dei fluidi:

$$X_{\text{wind}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}} V_{\text{aw}}^2 A_{\text{Fw}} C_X(\gamma_{\text{aw}})$$

$$Y_{\text{wind}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}} V_{\text{aw}}^2 A_{\text{Lw}} C_Y(\gamma_{\text{aw}})$$

$$N_{\text{wind}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{air}} V_{\text{aw}}^2 A_{\text{Lw}} L C_N(\gamma_{\text{aw}})$$

dove $\rho_{\text{air}}(kg/m^3)$ è la densità dell'aria; $V_{aw}(m/s) = \sqrt{u_{aw}^2 + v_{aw}^2}$ è la velocità relativa del vento; $u_{aw} = u_w - u$ e $v_{aw} = v_w - v$ sono le componenti apparenti della velocità del vento e $u_{\text{w}} = V_w \sin(\beta_w - \psi)$ e $v_{\text{w}} = V_{\text{w}} \cos(\beta_w - \psi)$ sono le componenti reali della velocità del vento; $A_{FW}(m^2)$ e $A_{LW}(m^2)$ sono rispettivamente le aree proiettate frontalmente e longitudinalmente della nave sottoposte all'azione del vento; $\gamma_{aw}(\text{rad}) = -\arctan\left(\frac{v_{\text{aw}}}{u_{\text{aw}}}\right)$ è l'angolo di direzione del vento rispetto alla prua della nave; C_X, C_Y, C_N sono dei coefficienti adimensionali specifici per la forma e le dimensioni della nave che possono essere ottenuti da test in galleria del vento o da dati empirici.
La velocità del vento spesso è espressa in termini di *Beaufort number*.

Beaufort number	Description of wind	Wind speed (knots)
0	Calm	0–1
1	Light air	2–3
2	Light breeze	4–7
3	Gentle breeze	8–11
4	Moderate breeze	12–16
5	Fresh breeze	17–21
6	Strong breeze	22–27
7	Moderate gale	28–33
8	Fresh gale	34–40
9	Strong gale	41–48
10	Whole gale	49–56
11	Storm	57–65
12	Hurricane	More than 65

Figura 2.4: *Beaufort number*

2.2.2 Forze e momenti generati dalla corrente

Come nel caso del vento, vengono definite V_c e γ_c che rappresentano rispettivamente la velocità e l'angolo di attacco della corrente, ossia l'angolo che si forma tra la direzione della corrente e la prua della nave, come mostrato in figura 2.3. Le forze e i momenti generati dalla corrente possono essere espressi dalle seguenti relazioni, derivanti anch'esse dalla meccanica dei fluidi:

$$X_{\text{current}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{c}} V_{\text{ac}}^2 A_{\text{Fc}} C_X(\gamma_{\text{ac}})$$

$$Y_{\text{current}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{c}} V_{\text{ac}}^2 A_{\text{Lc}} C_Y(\gamma_{\text{ac}})$$

$$N_{\text{current}} = \frac{1}{2}\rho_{\text{c}} V_{\text{ac}}^2 A_{\text{Lc}} L C_N(\gamma_{\text{ac}})$$

dove $\rho_{\text{c}}(kg/m^3)$ è la densità dell'acqua; $V_{ac}(m/s) = \sqrt{u_{ac}^2 + v_{ac}^2}$ è la velocità relativa della corrente; $u_{ac} = u_c - u$ e $v_{ac} = v_c - v$ sono le componenti apparenti della velocità della corrente e $u_{\text{c}} = V_c \sin(\beta_c - \psi)$ e $v_{\text{w}} = V_{\text{w}} \cos(\beta_c - \psi)$ sono le componenti reali della velocità della corrente; $A_{FC}(m^2)$ e $A_{LC}(m^2)$ sono rispettivamente le aree bagnate proiettate frontalmente e longitudinalmente della nave; $\gamma_{ac}(\text{rad}) = -\arctan\left(\frac{v_{\text{ac}}}{u_{\text{ac}}}\right)$ è l'angolo di direzione del vento rispetto alla prua della nave; C_X, C_Y, C_N sono dei coefficienti adimensionali specifici per la forma e le dimensioni della nave che possono essere ottenuti da test in galleria del vento o da dati empirici.

2.2.3 Forze e momenti generati dalle onde

Le forze dovute alle onde agenti su un'imbarcazione possono essere classificate in due tipi distinti:

- Forze del primo ordine: movimento legato alla frequenza delle onde caratterizzato da un moto oscillatorio a media nulla e proporzionali all'altezza d'onda;
- Forze del secondo ordine: forze caratterizzate da valori medi non nulli e da basse frequenze, con componenti che quindi variano lentamente.

Queste ultime forze tendono a causare un lento moto di deriva dell'imbarcazione e per questo motivo vengono denominate *wave drift forces and moments*. Per applicazioni di posizionamento dinamico, la compensazione dei moti indotti dalle forze d'onda del primo ordine è, generalmente, trascurata principalmente a causa della loro alta frequenza che risulta essere troppo veloce per essere compensata dagli attuatori. Queste forze e momenti possono comunque causare delle instabilità nel controllore. Le forze e i momenti dovuti alle forze d'onda del secondo ordine possono essere considerati proporzionali al quadrato dell'altezza dell'onda, che a sua volta può essere calcolato come il quadrato dell'inviluppo della storia temporale dell'elevazione dell'onda, che è ottenuto a partire dallo spettro del mare. Le forze e i momenti generati dalle onde possono quindi essere espressi nel seguente modo:

$$X_{\text{wave}} = H^2 C_x \cos \gamma_s$$

$$Y_{\text{wave}} = H^2 C_y \sin \gamma_s$$

$$N_{\text{wave}} = H^2 C_N \sin 2\gamma_s$$

dove C_x, C_y e C_N sono dei coefficienti della forza e del momento di deriva d'onda calcolati rispettivamente per mare di prua, mare al traverso e mare al giardinetto, mentre γ_s rappresenta l'angolo che si forma tra la direzione principale di provenienza dell'onda e la prua della nave.

2.3 Sistema di controllo

2.3.1 Osservatore dello stato

Nell'ambito del posizionamento dinamico, l'osservatore rappresenta una componente fondamentale per il sistema di controllo. Il suo compito principale è quello di prendere in input i dati e i segnali che provengono dai sensori a bordo della nave ed effettuare un'operazione di filtraggio per stimare con precisione lo stato reale della nave, ossia la sua posizione, la sua velocità e le sue accelerazioni.

L'operazione di filtraggio è resa necessaria dal fatto che le forze ambientali possono essere classificate in due componenti differenti:

- Componenti a bassa frequenza (LF);
- Componenti alla frequenza delle onde (WF).

Le prime sono associate a forze che variano lentamente e quindi a forze di deriva generate dalle onde, dall'azione del vento e della corrente: queste forze tendono ad allontanare l'imbarcazione dalla posizione desiderata, causando un movimento globale di quest'ultima. Le seconde, invece, rappresentano delle forze che variano ad una frequenza più elevata inducendo un moto oscillatorio a media nulla nella nave: queste forze devono essere filtrate perché risulterebbe essere troppo dispendioso in termini di consumi e potenza contrastarle attraverso l'azione di controllo. L'operazione di filtraggio può essere effettuata attraverso diverse tecniche tra cui la più semplice, dal punto di vista implementativo, è sicuramente quella che consiste nell'utilizzo di filtri passa-basso e filtri notch; per ottenere risultati migliori e più accurati viene spesso utilizzato il filtro Kalman. Dopo aver determinato lo stato reale dell'unità navale considerata, si passa ad un ulteriore fondamentale componente del sistema di posizionamento dinamico che è il controllore.

2.3.2 Controllore

Il controllore del sistema di posizionamento dinamico ricopre anch'esso un ruolo fondamentale perché ha come obiettivo quello di calcolare il vettore delle forze richieste τ_c che devono essere successivamente prodotte dai vari propulsori in modo da bilanciare l'azione delle forze ambientali esterne agenti sulla nave. Questo elemento, solitamente, richiede in ingresso i seguenti dati, derivanti dall'uscita dell'osservatore:

- Le componenti di velocità filtrate, espresse rispetto al sistema di riferimento solidale con la nave $\bar{b}_i$, $\quad \boldsymbol{v} = \begin{bmatrix} u & v & r \end{bmatrix}^T$;
- Le componenti di posizione filtrate, rispetto al sistema di riferimento inerziale $\bar{n}_i$, $\quad \boldsymbol{\eta} = \begin{bmatrix} x & y & \psi \end{bmatrix}^T$.

Essendo in possesso dei vettori v e η definiti precedentemente e corrispondenti alle quantità misurate dai sensori e filtrate dall'osservatore, è possibile confrontarli con i valori desiderati dal posizionamento dinamico per definire gli errori che devono poi essere annullati dal sistema di controllo: questi errori vengono calcolati semplicemente come differenza tra lo stato reale della nave, misurato e filtrato dall'osservatore, e lo stato desiderato imposto dall'operatore o dal pilota automatico.
Solitamente la tipologia di controllore più comunemente utilizzata nell'ambito del posizionamento dinamico è il controllore PID, acronimo di *Proporzionale Integrale Derivativo*, ossia le tre componenti principali di questo elemento.

Questo tipo di controllore agisce in base all'errore tra la posizione reale della nave e la posizione desiderata, quindi andando a confrontare il vettore η fornito in uscita dall'osservatore e il vettore η_{ref} contenente posizione ed orientamento della nave desiderati. Lo schema di controllo generale di un controllore PID è il seguente.

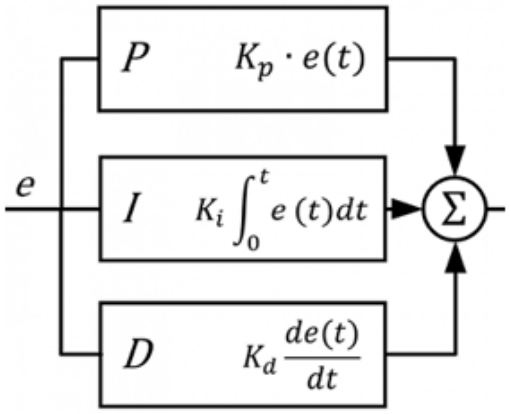


Figura 2.5: *Schema controllore PID*

La struttura del PID può essere introdotta supponendo che la variabile di controllo u risulti essere generata come somma di tre parti:

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t) = K_P e(t) + K_I \int_0^t e(\tau)\, d\tau + K_D \frac{d}{dt} e(t)$$

In particolare, si ha:

- Parte proporzionale ($u_P(t) = K_P e(t)$) che è, come da aspettative, proporzionale all'errore $e(t)$ tra la posizione ed orientamento misurati e quelli desiderati. Questa parte proporzionale risulta essere efficace nelle fasi iniziali del transitorio e determina la velocità di risposta del sistema rispetto al segnale di riferimento. Quanto più grande è il valore del fattore di proporzionalità K_P, tanto maggiore è la velocità di risposta. Si può osservare che a regime $t \to \infty$, i sistemi asintoticamente stabili sono caratterizzati da $e(t) \to 0$ e quindi $u_P(t) = K_p e(t) \to 0$. L'impiego di un regolatore proporzionale è solitamente limitato al controllo di processi asintoticamente o semplicemente stabili.

- Parte integrale ($u_I(t) = K_I \int_0^t e(\tau)\, d\tau$) che è proporzionale all'integrale dell'errore $e(t)$, cioè al suo valor medio, ed è richiesta per imporre l'annullamento asintotico dell'errore a fronte di segnali di riferimento o disturbi additivi costanti. Questa parte risulta quindi adibita all'annullamento dell'errore a regime. Tendenzialmente un controllore del tipo PI può produrre un tempo di assestamento non accettabile, *overshoot* eccessivi o instabilità. Questo tipo di regolatore è necessario nel momento in cui si debbano soddisfare requisiti sull'errore a transitorio esaurito, senza richiedere buone prestazioni in termini di velocità di risposta del sistema.

- Parte derivativa ($K_D \frac{d}{dt} e(t)$) che è proporzionale alla derivata dell'errore $e(t)$, cioè alla sua variazione di velocità, e ha come obiettivo quello di "anticipare" l'andamento dell'errore negli istanti futuri. Se ad esempio $\frac{de(t)}{dt}$ risulta strettamente positivo e così anche il guadagno del sistema, è opportuno aumentare la variabile di controllo $u(t)$, in modo tale da aumentare anche la variabile di uscita e ottenere quindi una diminuzione dell'errore $e(t)$.

Altri tipi di regolatori che possono essere utilizzati sono i seguenti:

- P, di facile implementazione, possono presentare problemi di *overshoot* se il sistema non è sufficientemente smorzato;
- PI e PID utilizzati per quando è necessario evitare prioritariamente l'errore a regime (ad esempio il *cruise control* per la velocità della nave);
- PD utilizzati quando è opportuno avere piccoli *overshoot* e quando non interessi l'annullamento dell'errore a regime poichè, ad esempio, tale condizione non viene mai raggiunta (ad esempio le eliche del sistema di posizionamento dinamico, il cui *set point* viene continuamente modificato in funzione delle condizioni ambientali).

Nell'ambito della simulazione e quindi in questo elaborato, questo elemento risulta essere trascurato, in quanto il simulatore richiede come input direttamente le forze ambientali calcolate con delle formule ricavate dai regolamenti.

2.4 Allocazione della spinta

L'uscita del controllore di un sistema di posizionamento dinamico è il vettore delle forze di controllo $\tau_c \in \mathbb{R}^n$, dove n rappresenta il numero dei gradi di libertà. Questo vettore passa all'algoritmo dell'allocazione che si divide in due parti:

- FAL (*Force Allocation Logic*) prende in input le forze e i momenti richiesti dal controllore e restituisce la forza e il momento richiesto da ogni attuatore;
- TAL (*Thrust Allocation Logic*) traduce la richiesta di spinta o coppia di ogni singolo attuatore in una richiesta di giri, passo o angolo di timone o azimut.

In questo paragrafo si analizzano le tecniche utilizzate per tradurre i comandi virtuali τ_c in uscita dal controllore in comandi reali per gli attuatori p, cioè come distribuire le forze tra i vari attuatori disponibili a bordo. Questo processo può essere risolto con diverse tecniche a seconda dell'unità navale che si vuole analizzare, ossia in base al numero di gradi di libertà n che si vogliono controllare e al numero di attuatori s presenti sulla nave esaminata. Come visto precedentemente, è possibile che in alcuni sistemi siano presenti più attuatori di quelli che realmente risultano essere necessari per controllare il movimento: questi sistemi prendono il nome di *over-actuated system*.

Questi sistemi possono risultare essere vantaggiosi per diversi motivi:

- Ridondanza in caso di guasti;
- Flessibilità progettuale nel caso in cui alcuni attuatori risultino essere più economici o più facili da mantenere;
- Condivisione tra più sistemi di controllo con obiettivi diversi.

Proprio per questo motivo, essendo che sono presenti più attuatori del necessario, il problema non ha una soluzione unica, ma esistono molti metodi diversi, a seconda del caso di studio che si vuole considerare, per ottenere lo stesso risultato. Prima di analizzare questi metodi per certi casi di studio, è opportuno elencare e descrivere brevemente quelli che sono le principali tipologie di attuatori più utilizzati nell'ambito delle unità navali dotate di sistema di posizionamento dinamico.

2.4.1 Tipologie di attuatori

In questo paragrafo vengono elencate e descritte brevemente le principali tipologie di attuatori installati su navi dotate di posizionamento dinamico.

Main propeller

I *main propeller* rappresentano il principale dispositivo di propulsione di una nave e possono fornire spinta positiva (marcia avanti) o spinta negativa (marcia indietro) solo in direzione longitudinale. Questi propulsori possono essere suddivisi in due tipologie differenti. I primi che vengono analizzati sono le eliche a pale fisse (FPP, *Fixed Pitch Propeller*). Questi propulsori sono diffusamente impiegati sulle navi mercantili e per le applicazioni da diporto. Le eliche FPP presentano alcuni vantaggi tra cui un basso costo rispetto ad altre soluzioni progettuali, elevato rendimento di elica isolata, richiesta di manutenzione ridotta e dimensioni diametrali che possono essere aumentate senza vincoli particolari; si hanno, però, anche dei difetti in quanto questo propulsore è ottimizzato per una sola velocità e non permette l'inversione del moto senza invertire il senso del moto dell'apparato motore. L'altra tipologia di *main propeller* è l'elica a pale orientabili (CPP, *Controllable Pitch Propeller*) che presenta la possibilità di muovere le pale rispetto all'asse uscente radialmente dal mozzo. Nelle eliche CPP si hanno i seguenti vantaggi:

- Possibilità di ottimizzare il punto di funzionamento del propulsore per diverse velocità, grazie alla possibilità di variare l'angolo di calettamento delle pale sul mozzo;
- Elevata efficienza a qualunque andatura, tranne che per la velocità di progetto se paragonata a quanto realizzato con un'elica FPP di pari dimensioni e forma;
- Inversione del moto rapida mediante la variazione dell'angolo di calettamento.

I difetti presentati da questo tipo di eliche sono:

- Impossibilità di realizzare grandi diametri per la presenza del meccanismo di movimentazione delle pale all'interno del mozzo;
- Rendimento inferiore alla velocità di progetto rispetto ad un'elica FPP di pari diametro e geometria;
- Costi di manutenzione elevati, legati alla complessità del sistema di movimentazione.

I *main propellers* possono inoltre essere accoppiati con i timoni e in questo caso, oltre a fornire spinta positiva o negativa in direzione longitudinale, è possibile, grazie all'angolo del timone, produrre forze laterali e momento di imbardata quando l'elica spinge in avanti, mentre in marcia indietro il timone risulta non essere efficace.

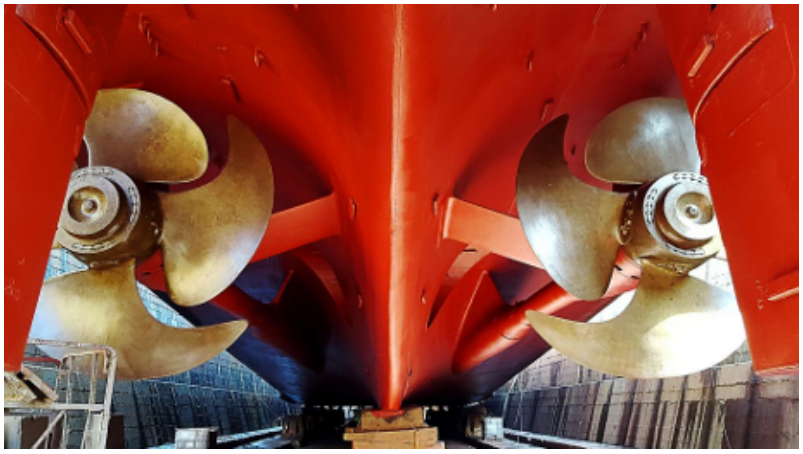


Figura 2.6: *Main propeller*

Bow/Stern Thruster

Questa tipologia di propulsori ausiliari sono dispositivi che si trovano generalmente nella parte anteriore della nave (*Bow thruster*) o nella parte posteriore (*Stern thruster*), solitamente il più a prora o a poppa possibile, compatibilmente con le sistemazioni interne e le forme di carena, in modo da massimizzare il braccio rispetto al centro di gravità della nave e quindi la capacità di rotazione di quest'ultima. Solitamente vengono montati in dei tunnel che attraversano lo scafo e possono fornire spinta laterale, facilitando le manovre a basse velocità e in spazi ristretti o durante l'ancoraggio: vengono quindi comunemente utilizzati per migliorare la manovrabilità della nave. Il numero di eliche di manovra da installare dipende dalla forza trasversale necessaria per la nave, dalla ridondanza richiesta ai sistemi di governo e dagli spazi disponibili per sistemare le eliche.

Figura 2.7: *Bow/Stern Thrusters*

Azimuth Thruster

Gli azimuth sono dei propulsori che possono essere ruotati di 360° attorno all'asse verticale in modo da produrre la spinta in una qualsiasi direzione voluta nel piano orizzontale. Questa caratteristica rende gli azimuth particolarmente utili per le navi che richiedono una notevole manovrabilità, come navi da crociera o per le navi offshore. La spinta di questo propulsore è di solito controllata attraverso la sua velocità angolare, l'angolo di passo o entrambi: in questo caso si hanno quindi due gradi di libertà riguardanti l'allocazione.

Figura 2.8: *Azimuth Thrusters*

2.4.2 Modellazione degli attuatori

La relazione che si ha tra il vettore delle forze in uscita dal controllore $\tau_c \in R^3$ e l'azione prodotta dai propulsori $u \in R^s$ è definita come:

$$\tau_c = T_{3\times s}(\alpha)T_d = T_{3\times s}(\alpha)Kp$$

dove $T_{3\times r}$ è la matrice di configurazione della spinta, s il numero dei propulsori e α è il vettore di orientazione delle spinte. Il corrispondente vettore delle spinte desiderate T_d è definito come $T_d = Kp$, con K matrice diagonale dei coefficienti di forza di spinta.
La spinta fornita dall'i-esimo propulsore viene calcolata come $T_{d_i} = k_i p_i$ dove k_i è il coefficiente di forza di spinta dell'i-esimo propulsore e p_i è l'input di controllo per l'i-esimo propulsore.
Per un propulsore fisso, l'angolo di orientamento è fissato e riflette l'orientamento reale del dispositivo; nel caso di un propulsore azimutale α_i è un ulteriore parametro di controllo che deve essere determinato dal problema di allocazione della spinta.

2.4.3 Ottimizzazione

Come descritto precedentemente, nel caso di *over-actuated system* essendo il numero di attuatori r maggiore del numero di gradi di libertà n il problema non ha un'unica soluzione, ma una di quelle più utilizzate e valida per tutti i casi di studio è sicuramente quella relativa alla risoluzione di un problema di ottimizzazione vincolato. Questo metodo ha come scopo quello di minimizzare una funzione obiettivo $f(x)$ nelle variabili x sotto certi vincoli di uguaglianza $h(x)$ e di disuguaglianza $g(x)$ che viene definito nel seguente modo:

$$\begin{aligned} &\min_x \quad f(x) \\ &\text{subject to} \quad \begin{cases} h_i(x) = 0, & i = 1, \dots, n \\ g_i(x) \leq 0, & i = 1, \dots, m \end{cases} \end{aligned}$$

dove n e m sono rispettivamente il numero dei vincoli di uguaglianza e di disuguaglianza. Questo tipo di problema può essere risolto con i software classici utilizzati per l'ottimizzazione numerica come ad esempio *Matlab* attraverso la funzione *fmincon* del *Matlab optimization toolbox*.

2.5 Classificazione e modalità operative

L'IMO ha identificato tre classi diverse per categorizzare i sistemi di posizionamento dinamico sulla base delle capacità di mantenimento della posizione della nave anche in condizioni degradate:

- Classe 1: appartengono a questa categoria mezzi con un sistema che consente di mantenere automaticamente la posizione e l'angolo di prora in predeterminate condizioni ambientali solo in condizioni di nave integra. La perdita di uno qualsiasi dei vari componenti dell'impianto DP non garantisce al mezzo la capacità di *station-keeping*;

- Classe 2: i mezzi appartenenti a questa categoria sono dotati di un sistema DP che consente di mantenere automaticamente la posizione e l'angolo di prora in predeterminate condizioni ambientali anche in condizioni di nave degradata. La perdita di uno qualsiasi (*single failure*) dei componenti dell'impianto DP non comporta la perdita della posizione;

- Classe 3: i mezzi appartenenti a questa categoria sono dotati di un sistema DP che consente di mantenere automaticamente la posizione e l'angolo di prora in predeterminate condizioni ambientali anche in condizioni di nave degradata. La perdita di uno qualsiasi (*single failure*) dei componenti dell'impianto DP, così come dell'allagamento o dell'incendio di un compartimento, non comporta la perdita della posizione.

Il guasto in questo caso viene percepito come un evento che accade ad un impianto o ad un suo componente e che causa la perdita di una funzione di sistema e/o il deterioramento delle capacità funzionali di entità tale da compromettere la sicurezza della nave, del personale o dell'ambiente. Nei sistemi di posizionamento dinamico, gli impianti vengono classificati sulla base della sopravvivenza ad un guasto e non sulle sue prestazioni. A seconda del registro di classifica si devono rispettare diversi requisiti per le varie classi dei sistemi di posizionamento dinamico. Principalmente i sistemi DP possono avere le seguenti modalità:

- Modalità manuale: in questa modalità si ha bisogno dell'intervento manuale dell'operatore addetto al sistema di posizionamento dinamico che corregge manualmente la posizione tramite un *Joystick* e l'orientamento della prora tramite un controllore rotativo;

- Modalità *Auto position* e *Auto heading*: è una modalità che permette di mantenere la posizione e l'orientazione della prua richiesti automaticamente;

- Modalità *Auto Track*: con questa modalità la nave viene mantenuta su una determinata traiettoria descritta da una serie di *waypoints* con una determinata velocità e con un determinato orientamento della prua della nave che può non coincidere con quello di rotta;

- Modalità *Follow Target*: questa modalità permette alla nave di seguire automaticamente un obiettivo mobile costantemente.

In aggiunta a queste modalità sono state sviluppate diverse modalità per ottimizzare il funzionamento delle imbarcazioni per una vasta gamma di applicazioni e di tipi di navi. In base alla classe di DP per cui si vuole ottenere la certificazione, i vari enti di certificazione forniscono dei requisiti minimi che le unità devono avere in termini di sistemi e della loro ridondanza.

Capitolo 3

Algoritmi di risoluzione per l'allocazione della spinta

In questo capitolo viene presentato un caso di studio finalizzato all'analisi e alla risoluzione del problema di allocazione della spinta su un'imbarcazione reale. L'obiettivo principale è quello di applicare le nozioni teoriche di un sistema di posizionamento dinamico prima introdotte, con particolare attenzione alla fase di allocazione della spinta (*Thrust Allocation*), su un'unità esistente per la quale sono disponibili i dati geometrici, le caratteristiche dei propulsori e i vincoli operativi. Il sistema propulsivo presente su questa imbarcazione è costituito da due propulsori azimutali completamente ruotabili (da 0° a 360°) e da due *bow thruster* capaci di compensare le sole forze trasversali. Questo tipo di sistema propulsivo consente di avere una certa flessibilità nelle strategie di allocazione e per questo motivo sono stati implementati e confrontati tre diversi metodi di allocazione della spinta, ciascuno con un diverso livello di complessità e di vincoli imposti. I tre metodi di allocazione implementati sono i seguenti:

- Allocazione mediante ottimizzazione vincolata, per il quale direzione e modulo della spinta di ciascun propulsore vengono ottimizzati liberamente per minimizzare un'opportuna funzione (ad esempio minimizzare il consumo energetico o le spinte), definita funzione obiettivo, nel rispetto dei vincoli imposti;

- Allocazione con direzione fissata, dove entrambi i propulsori azimutali possono ruotare liberamente da 0° a 360°, ma imponendo che entrambi spingano con lo stesso angolo di rotazione; si tratta di una strategia semplificata che riduce la complessità operativa in quanto si deve semplicemente risolvere un problema di tre equazioni in tre incognite;

- Allocazione con assi fissi, dove i due azimut vengono mantenuti a direzioni fisse predefinite (uno a 0° e l'altro a 90° o viceversa o entrambi a 0°); questo metodo rappresenta un approccio utile nel caso in cui si desidera ridurre al minimo i movimenti meccanici dei propulsori.

Per ciascuna delle tre strategie verranno presentati il modello matematico, diversi tipi di implementazione e i risultati ottenuti, andando a confrontare i vari metodi ed evidenziando vantaggi, svantaggi e implicazioni operative.

3.1 Imbarcazione considerata e dati disponibili

Il caso di studio analizzato si basa su un *supply vessel* fornito dal cantiere *VARD*, progettato per operazioni *offshore*. Questa imbarcazione è equipaggiata con un sistema di propulsione avanzato, costituito da due propulsori azimutali capaci di ruotare da 0° a 360° nella zona di poppa e due *bow thruster* nella zona di prora, rendendola adatta ed efficiente per operazioni di *station keeping* tramite sistema di posizionamento dinamico. In figura 3.1 e in tabella 3.1 vengono riportate un'immagine dell'unità navale scelta come caso di studio e una tabella riassuntiva delle caratteristiche principali dell'unità navale considerata.

Figura 3.1: *Caso di studio considerato*

L_{OA} (m)	78
L_{PP} (m)	64.2
L_{OS} (m)	78
B (m)	19
T_{DESIGN} (m)	5.6

Tabella 3.1: *Dimensioni principali dell'imbarcazione*

3.1.1 Configurazione propulsiva

L'unità navale considerata è dotata di due propulsori azimutali, capaci di ruotare entrambi di 360°, posizionati simmetricamente rispetto all'asse longitudinale, nella zona poppiera della nave. Questi propulsori sono in grado di generare spinte aventi direzioni e moduli controllabili, consentendo quindi un'elevata flessibilità nelle manovre e nelle strategie per risolvere il problema di allocazione della spinta. Oltre a questi, la nave è dotata anche di due *thruster* posizionati nella zona di prora (*bow thruster*), utilizzabili per migliorare il sistema di posizionamento dinamico, soprattutto nel momento in cui si devono compensare delle componenti trasversali elevate di forze ambientali. In tabella 3.2 vengono riportate le coordinate delle posizioni dei propulsori presenti sull'imbarcazione considerata, espresse rispetto al sistema di riferimento solidale con la nave che ha origine nel centro, con asse x orientato verso prora, asse y orientato verso dritta e asse z orientato verso l'alto come riportato nella figura 2.1.

x azimut sinistro (m)	-26.75
y azimut sinistro (m)	-4.08
x azimut destro (m)	-26.75
y azimut destro (m)	4.08
x bow prua (m)	32.8
x bow poppa (m)	29.8
y bow prua (m)	0
y bow poppa (m)	0
x bow equivalente (m)	31.3
y bow equivalente (m)	0

Tabella 3.2: *Coordinate dei propulsori*

In particolare, in tutti i casi analizzati per semplificare il problema si considera un solo *bow thruster* equivalente, avente una spinta pari alla somma dei due separati e posizionato a metà tra i due: in questo modo si riesce a diminuire il numero di incognite da determinare nelle varie strategie di allocazione della spinta.

3.2 Problema di allocazione della spinta

3.2.1 Forze ambientali

Per questo caso di studio le forze ambientali (vento, onde e corrente) che agiscono sulla nave e alle quali l'imbarcazione deve resistere per mantenere la posizione desiderata sono state calcolate utilizzando le formule fornite dall'ente di classifica DNV-GL.

In particolare le forze ambientali totali X_{env}, Y_{env} e il momento N_{env} vengono valutate sotto l'ipotesi del principio di sovrapposizione lineare come segue.

$$\begin{cases} X_{\text{env}} = X_{\text{wind}} + X_{\text{wave}} + X_{\text{current}} \\ Y_{\text{env}} = Y_{\text{wind}} + Y_{\text{wave}} + Y_{\text{current}} \\ N_{\text{env}} = N_{\text{wind}} + N_{\text{wave}} + N_{\text{current}} \end{cases}$$

Di seguito, vengono riportate tutte le formulazioni con la descrizione di tutti i parametri utilizzati per il calcolo di forze e momenti dei disturbi ambientali.

Vento

Le formule utilizzate per calcolare forze e momenti generati dal vento sono le seguenti.

$$\begin{cases} X_{\text{wind}} = 0.5\,\rho_{\text{air}}\,V_{\text{wind}}^2\,A_{F,wind}\,(-0.7\cos\gamma_w{}') \\ Y_{\text{wind}} = 0.5\,\rho_{\text{air}}\,V_{\text{wind}}^2\,A_{L,wind}\,(0.9\sin\gamma_w') \\ N_{\text{wind}} = Y_{\text{wind}}\,\left(x_{L,air} + 0.3\,L_{PP}\,(1 - 2\frac{\gamma_w'}{\pi})\right) \end{cases}$$

dove

$$\gamma_w' = \begin{cases} \gamma_w, & 0 \leq \gamma_w \leq \pi \\ 2\pi - \gamma_w, & \pi \leq \gamma_w \leq 2\pi \end{cases}$$

γ_w è la direzione di provenienza del vento, $A_{F,wind}$ è l'area frontale esposta al vento, $A_{L,wind}$ è l'area longitudinale esposta al vento, $x_{L,air}$ è la posizione longitudinale del centro dell'area $A_{L,wind}$, ρ_{air} è la densità dell'aria pari a $1.226\frac{kg}{m^3}$, V_{wind} è la velocità del vento, L_{PP} è la lunghezza tra le perpendicolari.

Corrente

Le formule utilizzate per calcolare forze e momenti generati dalla corrente sono le seguenti.

$$\begin{cases} X_{\text{current}} = 0.5\,\rho_{\text{water}}\,V_{\text{current}}^2\,B\,T\,\,(-0.07\cos\gamma_c') \\ Y_{\text{current}} = 0.5\,\rho_{\text{water}}\,V_{\text{current}}^2\,A_{L,current}\,(0.6\sin\gamma_c') \\ N_{\text{current}} = Y_{\text{current}}\,\left(x_{L,current} + L_{PP}\,\max\left(\min\left(0.4\,\left(1 - 2\frac{\gamma_c'}{\pi}\right), 0.25\right), -0.2\right)\right) \end{cases}$$

dove:

$$\gamma_c' = \begin{cases} \gamma_c, & 0 \leq \gamma_C \leq \pi \\ 2\pi - \gamma_c, & \pi \leq \gamma_c \leq 2\pi \end{cases}$$

γ_c è la direzione di provenienza della corrente, $A_{L,current}$ è l'area longitudinale immersa, B è la massima larghezza della figura di galleggiamento, T è l'immersione di progetto, $x_{L,current}$ è la posizione longitudinale del centro dell'area di $A_{L,current}$, ρ_{water} è la densità dell'acqua di mare pari a $1026\frac{kg}{m^3}$, V_{current} è la velocità della corrente.

Onde

Le formule utilizzate per calcolare forze e momenti generati dalle onde sono le seguenti.

$$\begin{cases} X_{\text{wave}} = 0.5\,\rho_{water} g\, H_S^2\, B\, h(\gamma_s, b_{an}, C_{WL_{aft}})\, f(T'_{surge}) \\ \\ Y_{\text{wave}} = 0.5\,\rho_{water}\, g\, H_S^2\, L_{OS}\, 0.09\, \sin\gamma_s\, f(T'_{sway}) \\ \\ N_{\text{wave}} = Y_{wave}\, \left(x_{Los} + L_{OS}\left(0.05 - 0.14\frac{\gamma'_s}{\pi}\right)\right) \end{cases}$$

dove

$$h(\gamma_s, b_{an}, C_{WL_{aft}}) = 0.09\, h_1(\gamma_s, b_{an}, C_{WL_{aft}})\, h_2(\gamma_s)\ ;$$

$$h_1(\gamma_s, b_{an}, C_{WL_{aft}}) = 0.8\, b_{an}^{0.45} + \frac{\gamma'_s}{\pi}\left(0.7\, C_{WL_{aft}}^2 - 0.8\, b_{an}^{0.45}\right)\ ;$$

$$h_2(\gamma_s) = 0.05 + 0.95\ \arctan\left(1.45\,(\gamma'_s - 1.75)\right)$$

$$\gamma'_s = \begin{cases} \gamma_s, & 0 \le \gamma_s \le \pi \\ 2\pi - \gamma_s, & \pi \le \gamma_S \le 2\pi \end{cases} \qquad f(T') = \begin{cases} 1, & \text{se } T' < 1 \\ T'^{-3} e^{1-T'^{-3}}, & \text{se } T' \ge 1 \end{cases}$$

$$T'_{surge} = \frac{T_z}{0.9\, L_{PP}^{0.33}} \quad T'_{sway} = \frac{T_z}{0.75\, B^{0.5}}$$

H_S è l'altezza significativa d'onda, L_{OS} è la lunghezza tra il punto più a proravia e quello a poppavia sott'acqua, x_{Los} è la distanza longitudinale di $L_{OS}/2$, b_{an} è l'angolo tra l'asse longitudinale dell'imbarcazione e una linea tracciata dal punto più avanzato sulla linea di galleggiamento fino al punto con coordinata trasversale $y = B/4$ (posto anteriormente rispetto a $L_{PP}/2$) sulla stessa linea di galleggiamento. Questo angolo è quindi calcolato come

$$b_{an} = \arctan \frac{B/4}{x_{max} - x_{B/4}}$$

con x_{max} la coordinata longitudinale del punto più avanzato sulla linea di galleggiamento e $x_{B/4}$ la coordinata longitudinale del punto sulla linea di galleggiamento in corrispondenza della coordinata trasversale $y = B/4$. In figura 3.2 viene riportata l'immagine utilizzata per la definizione del bow angle.

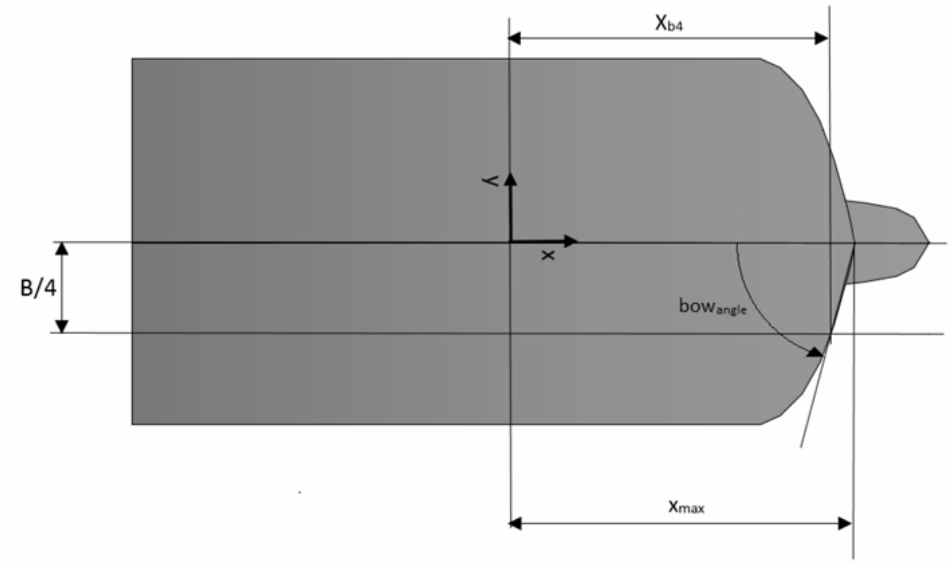


Figura 3.2: *Definizione bow angle*

Inoltre C_{WLaft} è il coefficiente di finezza della figura di galleggiamento a poppavia della sezione maestra e calcolato come

$$C_{WLaft} = \frac{2\,A_{WLaft}}{L_{PP}\,B}$$

A_{WLaft} è l'area della figura di galleggiamento per $x < 0$, γ_s è la direzione di provenienza delle onde.

3.2.2 Allocazione della spinta

Dopo aver calcolato le forze ambientali da compensare, si è passati alla risoluzione del problema di allocazione con diverse modalità operative. Le forze ambientali, infatti, devono essere efficientemente allocate agli attuatori e quindi si passa alla logica di allocazione che si suddivide in due parti: la FAL (*Force Allocation Logic*) che prende in input le forze e i momenti richiesti e restituisce la forza e il momento richiesto ad ogni attuatore; la TAL (*Thrust Allocation Logic*) che traduce la richiesta di spinta o momento di ogni attuatore in una richiesta di giri o passo. Per questo caso di studio, l'assetto propulsivo concede un certo numero di gradi di libertà: in particolare ogni azimutale crea due incognite, ovvero la spinta $T_{sx/dx}$ e l'angolo $\delta_{sx/dx}$, oppure le due componenti della spinta $X_{sx/dx}$ e $Y_{sx/dx}$, mentre i bow thruster, avendo già la direzione fissata, creano una sola incognita T_{BT}.

In totale questo problema genera quindi sei incognite
$[X_{sx}, Y_{sx}, X_{dx}, Y_{dx}, T_{BT}^{prua}, T_{BT}^{poppa}]$, che compaiono nelle equazioni di equilibrio:

$$\begin{cases} X_R + X_{sx} + X_{dx} = 0 \\ Y_R + Y_{sx} + Y_{dx} + T_{BT}^{prua} + T_{BT}^{poppa} = 0 \\ N_R + X_{sx}\, y_{az}^{sx} - Y_{sx}\, x_{az}^{sx} + X_{dx}\, y_{az}^{dx} - Y_{dx}\, x_{az}^{dx} - T_{BT}^{prua}\, x_{bow}^{prua} - T_{BT}^{poppa}\, x_{bow}^{poppa} = 0 \end{cases}$$

dove:

$$\begin{cases} \underline{T}_{sx} = X_{sx}\, \underline{b}_1 + Y_{sx}\, \underline{b}_2 \\ \underline{T}_{dx} = X_{dx}\, \underline{b}_1 + Y_{dx}\, \underline{b}_2 \\ \delta_i = \arctan\left(\dfrac{Y_i}{X_i}\right), \quad i = dx,\ sx \end{cases}$$

dove X e Y sono rispettivamente le componenti di spinta lungo l'asse $\underline{b}_1$, parallelo all'asse di simmetria, e lungo l'asse $\underline{b}_2$, perpendicolare a quello precedente, δ corrisponde all'angolo richiesto all'azimutale per soddisfare le richieste di spinta. In Figura 3.3 viene riportato uno schema indicativo delle spinte e degli angoli di rotazione dei vari propulsori.

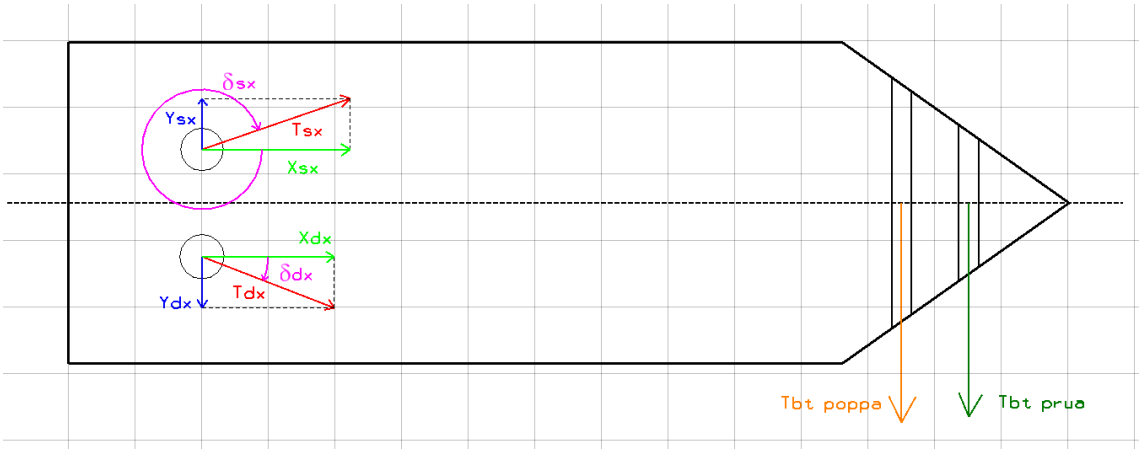


Figura 3.3: *Schema delle spinte dei propulsori*

Si tratta quindi di risolvere un problema di tre equazioni (le equazioni di equilibrio scritte precedentemente) in sei incognite. In particolare, in questo caso di studio il sistema propulsivo della nave riuslta essere sovra-attuato, ovvero ci sono più attuatori rispetto ai gradi di libertà da controllare: il problema risulta quindi essere indeterminato ed esistono infinite combinazioni di comandi che generano la stessa spinta risultante. Proprio per questo motivo si possono considerare diverse modalità operative che permettono di risolvere il sistema di equilibrio.

3.3 Metodi di allocazione implementati

Come detto precedentemente, essendo il sistema propulsivo di quest'imbarcazione sovra-attuato, è possibile implementare diverse strategie di soluzione dell'allocazione di spinta. In particolare, sono stati sviluppati, risolti e confrontati tre diversi metodi di allocazione che verranno di seguito discussi:

- Ottimizzazione vincolata;
- Direzione fissata;
- Assi fissi.

3.3.1 Ottimizzazione vincolata

Il primo approccio adottato per la risoluzione del problema di allocazione della spinta è basato sulla formulazione di un problema di ottimizzazione vincolata. L'obiettivo è determinare i comandi da inviare ad ogni singolo propulsore in modo tale da generare una spinta risultante che compensi i disturbi ambientali, rispettando i vincoli operativi del sistema. In presenza di un sistema sovra-attuato, l'allocazione della spinta diventa un problema indeterminato che è risolvibile mediante l'ottimizzazione di una funzione *f(x)*, definita funzione obiettivo. Lo scopo è quindi minimizzare questa funzione obiettivo *f(x)* nelle variabili x, rispettando i vincoli di uguaglianza *h(x)* e di disuguaglianza *g(x)* imposti.
Il problema è dunque formalizzato come segue.

$$\begin{aligned} \min_{x \in \mathbb{R}^r} \quad & f(x) \\ \text{subject to} \quad & h_i(x) = 0, \quad i = 1, \ldots, n \\ & g_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \ldots, m \end{aligned}$$

dove n e m sono rispettivamente il numero di vincoli di uguaglianza e di disuguaglianza.
La risoluzione del problema è stata effettuata sul software *Matlab*, sfruttando algoritmi di ottimizzazione numerica forniti direttamente dal programma come descritto nei paragrafi seguenti.
In questo contesto, la funzione obiettivo definisce il criterio che permette di selezionare la soluzione "migliore" tra quelle ammissibili. In particolare, la funzione obiettivo, che è stata scelta per questo caso di studio, ha come scopo quello di minimizzare la spinta totale dei vari propulsori presenti. La formula utilizzata è la seguente.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{k} T_i^2$$

dove k è il numero di propulsori e T_i è la spinta dell'i-esimo propulsore. Le incognite x del problema sono riportate di seguito.

$$x = [T_{sx}, T_{dx}, T_{bow}, X_{sx}, Y_{sx}, X_{dx}, Y_{dx}]$$

dove T_{sx} e T_{dx} sono i moduli delle spinte degli azimut destro e sinistro, T_{bow} è la spinta del *bow thruster* equivalente e X e Y sono rispettivamente le componenti longitudinale e trasversale della spinta degli azimut T.
I vincoli di uguaglianza, in questo problema, riguardano l'equilibrio statico del corpo rigido e le relazioni tra il modulo della spinta dei propulsori e le sue componenti. In particolare, i vincoli di uguaglianza per questo sistema propulsivo sono riportati di seguito.

$$h(x) = \begin{cases} X_R - X_{sx} - X_{dx} \\ Y_R - Y_{sx} - Y_{dx} - T_{bow} \\ N_R - x_{bow}\, T_{bow} - x_{sx}\, Y_{sx} + y_{sx}\, X_{sx} - x_{dx}\, Y_{dx} + y_{dx}\, X_{dx} \\ T_{sx}^2 - X_{sx}^2 - Y_{sx}^2 \\ T_{dx}^2 - X_{dx}^2 - Y_{dx}^2 \end{cases}$$

Una volta calcolate le spinte dei vari propulsori e le loro componenti è stato poi possibile calcolare gli angoli di rotazione degli azimut con la seguente formula:

$$\delta_i = atan(\frac{Y_i}{X_i})$$

Per risolvere questo problema di ottimizzazione vincolata, si è fatto ricorso alla funzione *fmincon* su *Matlab*. L'algoritmo interno a *fmincon* utilizza un metodo iterativo di tipo *Sequential Quadratic Programming (SQP)*, che consente di trovare la soluzione ottima nel rispetto di tutti i vincoli imposti. Si rimanda ai paragrafi successivi per la rappresentazione dei risultati ottenuti che vengono descritti per ogni scenario operativo considerato.

3.3.2 Assi fissi

Il secondo approccio che è stato considerato per la risoluzione del problema di allocazione della spinta consiste nel lavorare su angoli di azimut costanti in modo da evitare di ricadere in quelle zone di forte interazione tra i vari propulsori che potrebbero causare grosse perdite di efficienza. Con questo tipo di approccio, fissando gli angoli, il numero di incognite del problema scende a quattro.

$$x = [T_{sx}, T_{dx}, T_{bow}^{prua}, T_{bow}^{poppa}]$$

In aggiunta, considerando i due *bow thruster* come uno unico equivalente avente spinta pari alla somma delle spinte dei due separati e posizionato a metà tra i due,

il numero di incognite si riduce ulteriormente a tre ed è quindi possibile trovare la soluzione al problema di equilibrio poichè si deve risolvere un semplice problema di 3 equazioni (equazioni di equilibrio lungo x, lungo y e del momento) in 3 incognite $x = [T_{sx}, T_{dx}, T_{bow}^{eq}]$.
Per la risoluzione della parte di *Force Allocation Logic (FAL)*, questa logica ad angoli fissati è stata sviluppata definendo tre diverse combinazioni di angoli in modo da soddisfare tutte le situazioni che potrebbero presentarsi.
Le tre combinazioni sono definite di seguito:

- la prima è stata denominata "sb-pt0" ed è la soluzione per la quale entrambi gli azimutali sono posti a 0°; questa soluzione si utilizza nei casi in cui sono richiesti piccoli momenti o piccole forze laterali, che possono essere bilanciati dalle sole forze dei *bow thruster*. In questo caso il vettore delle forze e dei momenti richiesti dai vari propulsori è dato da $\tau_{all} = [X_{sx}, X_{dx}, T_{bt}]$. In questo modo è possibile scrivere le equazioni di equilibrio da cui si ricava la matrice di allocazione che è necessario invertire per determinare le tre incognite (τ_{all}).

$$\tau_R = A\,\tau_{all}$$

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ y_{sx} & y_{dx} & -x_{bt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{sx} \\ X_{dx} \\ Y_{bt} \end{bmatrix}$$

- la seconda soluzione, denominata "pt90", è quella in cui il propulsore azimutale di sinistra è ruotato di 90° mentre quello di destra è posto a 0°. In questo caso, così come in quello successivo, si ha un propulsore volto a compensare la spinta orizzontale (quindi posto a 0°) e un altro volto a compensare la spinta laterale insieme ai due *bow thruster*. Viene posta inoltre molta attenzione al fatto che il propulsore ruotato attorno al suo asse verticale spinga sempre verso l'esterno e mai contro l'altro propulsore, cosa che influenza la scelta di questa allocazione o della successiva. In questo caso il vettore di forze e momenti richiesti dai vari propulsori è dato da $\tau_{all} = [X_{dx}, Y_{sx}, Y_{bt}]$. Scrivendo le equazioni di equilibrio per la seguente risoluzione di allocazione si ottiene il seguente sistema:

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & -1 \\ -x_{sx} & y_{dx} & -x_{bt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{sx} \\ X_{dx} \\ Y_{bt} \end{bmatrix}$$

- la terza ed ultima soluzione, denominata "sb-90", è quella in cui il propulsore azimutale di destra viene ruotato di 270° e quello di sinistra è invece posto a 0°. Si tratta della configurazione simmetrica a quella precedentemente descritta e la cui scelta è fatta in base al segno della forza lungo il versore b_2 trovata dall'allocazione. In questo caso il vettore di forze e momenti richiesti dai vari propulsori risulta essere pari a $\tau_{all} = [X_{sx}, Y_{dx}, T_{bt}]$. Come prima,

scrivendo le equazioni di equilibrio per la seguente risoluzione di allocazione otteniamo il seguente sistema:

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ y_{sx} & -x_{dx} & -x_{bt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{sx} \\ Y_{dx} \\ Y_{bt} \end{bmatrix}$$

Nella Figura 3.4 si riporta uno schema delle tre combinazioni appena descritte.

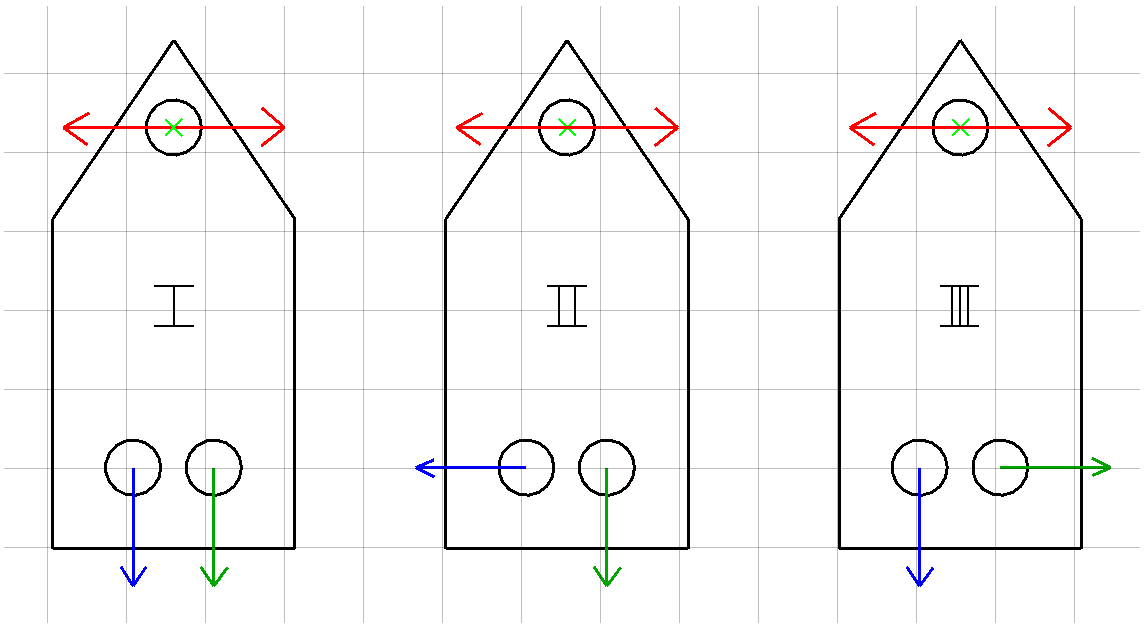


Figura 3.4: *Logiche di allocazione forze*

In particolare, la soluzione "sb-pt0" corrisponde al primo caso di Figura 3.4, la soluzione "pt90" corrisponde al secondo caso di figura e la soluzione "sb-90" corrisponde invece al terzo caso.
In tutte e tre le allocazioni si considerano gli angoli dei propulsori azimutali come noti e fissati mentre i due *bow thruster* vengono schematizzati attraverso un modello equivalente che considera la spinta come somma delle due e il braccio come una media tra i due. In questo modo è possibile ridurre il numero di incognite a tre e, quindi, risolvere il problema di allocazione tramite le tre equazioni di equilibrio.
La scelta di allocazione viene effettuata in modo da garantire che i propulsori non spingano mai l'uno contro l'altro, ovvero si deve verificare la seguente condizione:

$$\begin{cases} Y_{dx} < 0, & \textit{allocazione} = \text{“sb-90”} \\ Y_{sx} > 0, & \textit{allocazione} = \text{“pt-90”} \end{cases}$$

Si sono così ricavate, dalle equazioni di equilibrio precedenti, le espressioni di Y_{dx} e di Y_{sx} e vi sono state imposte le condizioni sopra citate, ottenendo le seguenti relazioni:

$$\begin{cases} Y_{dx} = \dfrac{y_{sx}X_R - x_{bt}Y_R + N_R}{x_{bt} - x_{dx}} < 0 \\ \\ Y_{sx} = \dfrac{y_{dx}X_R - x_{bt}Y_R + N_R}{x_{bt} - x_{dx}} > 0 \end{cases}$$

Essendo che il denominatore è sempre positivo poichè $x_{bt} - x_{dx} > 0$ e che i due propulsori azimutali sono disposti simmetricamente rispetto all'asse longitudinale della nave poichè $y_{sx} = -y_{dx}$, è possibile riscrivere le due condizioni precedenti nel seguente modo:

$$\begin{cases} -y_{dx}\, X_R - x_{bt}\, Y_R + N_R < 0, & \textit{allocazione} = \text{“sb-90”} \\ y_{dx}\, X_R - x_{bt}\, Y_R + N_R > 0, & \textit{allocazione} = \text{“pt90”} \end{cases}$$

Così facendo, si nota come ci sia un intervallo in cui le due condizioni si sovrappongono e uno in cui non vi è alcuna condizione: questi due intervalli sono quelli per cui si ha una richiesta di forza laterale o di momento piccola e sono quindi gli intervalli in cui viene attuata l'allocazione che vede entrambi i propulsori azimutali disposti a 0° e in cui la richiesta laterale viene soddisfatta dai soli *bow thruster*. A questo punto è possibile quindi definire le condizioni per selezionare la corretta allocazione da risolvere tramite il seguente sistema:

- se $|x_{bt}Y_R - N_R| < |y_{sx}X_R|$ o $|x_{bt}Y_R - N_R| < a$, allora $\delta_{dx} = \delta_{sx} = 0$;
- se $|x_{bt}Y_R - N_R| \geq |y_{sx}X_R|$, allora si ha:
  - se $x_{bt}Y_R - N_R < 0$, allora $\delta_{dx} = -90$ e $\delta_{sx} = 0$;
  - altrimenti se $x_{bt}Y_R - N_R \geq 0$, allora $\delta_{dx} = 0$ e $\delta_{sx} = 90$

dove a è un coefficiente che viene introdotto per evitare transizioni veloci tra un'allocazione e l'altra in prossimità dell'origine. Risolvendo questo tipo di problema si possono quindi ottenere le tre incognite prima elencate a seconda dell'allocazione scelta.
Si rimanda ai paragrafi successivi per la rappresentazione dei risultati ottenuti che vengono descritti per ogni scenario operativo considerato.

3.3.3 Direzione fissata

Il terzo e ultimo approccio per la risoluzione del problema di allocazione della spinta è stato sviluppato assumendo una configurazione semplificata del sistema propulsivo dell'imbarcazione considerata: in particolare, in questo caso si suppone che i due propulsori azimutali possano ruotare entrambi da 0° a 360° con l'imposizione, però, che entrambi debbano spingere con lo stesso angolo di rotazione, riuscendo quindi a ridurre il numero di incognite.
Si considera un modello equivalente del sistema, in cui:

- i due propulsori azimutali di poppa, avendo lo stesso angolo di rotazione, sono stati rappresentati da un unico propulsore azimutale equivalente, ipotizzando quindi che la spinta totale sia pari alla somma delle spinte dei due azimutali separati e la sua posizione geometrica sia posta a metà tra i due propulsori reali;
- allo stesso modo, come nei casi precedenti, anche i due *bow thruster* sono stati sostituiti da uno unico equivalente.

In questo modo il vettore di forze e momenti richiesti dai vari propulsori è dato da:

$$\tau_{all} = [X_{az}^{eq}, Y_{az}^{eq}, T_{bow}^{eq}]$$

Scrivendo le equazioni di equilibrio per la seguente risoluzione del problema di allocazione della spinta si ottiene il seguente sistema di tre equazioni (di equilibrio) in tre incognite:

$$\begin{bmatrix} X_R \\ Y_R \\ N_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 \\ y_{az}^{eq} & -x_{az}^{eq} & -x_{bow}^{eq} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{az}^{eq} \\ Y_{az}^{eq} \\ T_{bow}^{eq} \end{bmatrix}$$

Data la struttura lineare del sistema e la presenza di un sistema di tre equazioni in tre incognite, il problema è stato semplicemente risolto su *Matlab* utilizzando il comando di inversione della matrice.
Si rimanda ai paragrafi successivi per la rappresentazione dei risultati ottenuti che vengono descritti per ogni scenario operativo considerato.

3.4 Scenari operativi analizzati

Per valutare e confrontare i metodi di risoluzione dell'allocazione di spinta, sono stati sviluppati diversi scenari operativi per ognuno dei tre metodi descritti precedentemente, tra cui:

- Caso statico, in cui si è ipotizzato che tutti i disturbi ambientali provenissero da un'unica direzione fissata; questo scenario serve come riferimento per valutare le prestazioni base di ciascun metodo;

- Caso di analisi direzionale, in cui è stato fatto variare l'angolo di provenienza delle forze ambientali da 0° a 360°, calcolando per ogni direzione la somma dei moduli delle spinte di tutti i propulsori per contrastare i disturbi esterni, ottenendo una curva rappresentativa dell'efficienza direzionale del sistema;

- Caso realistico, in cui è stata fornita una storia temporale di velocità e direzione del vento e della corrente, oltre che ad una storia temporale di altezza significativa, periodo e direzione delle onde, da cui sono state ricavate le forze dei disturbi esterni da bilanciare istante per istante, simulando quindi un'operazione in condizioni ambientali reali.

Questi scenari coprono sia condizioni semplificate e teoriche, ideali per l'analisi comparativa e la validazione iniziale dei modelli, sia situazioni più complesse e realistiche, che permettono di valutare la robustezza, l'efficienza e la stabilità delle soluzioni implementate.
Nel presente lavoro sono stati utilizzati due principali sistemi di riferimento, fondamentali per l'interpretazione delle forze, delle direzioni e dei momenti agenti sull'imbarcazione.
Il primo é il sistema di riferimento della nave, cioè un sistema cartesiano tridimensionale solidale con lo scafo, con origine nel centro geometrico della nave sul piano di galleggiamento. Le convenzioni adottate sono le seguenti:

- asse x positivo verso prora;

- asse y positivo verso dritta;

- asse z positivo verso l'alto.

Questo sistema viene utilizzato per esprimere le componenti delle forze e delle spinte, oltre che per la definizione delle posizioni dei propulsori.
Il secondo sistema di riferimento è quello che viene utilizzato per definire le direzioni di provenienza delle forze ambientali che vengono espresse rispetto a un sistema assoluto riferito all'ambiente, fisso rispetto alla Terra. Gli angoli di provenienza delle forze sono stati definiti con la seguente convenzione:

- 0° corrisponde a una forza proveniente da prora (positiva da prora verso poppa);

- 90° corrisponde ad una forza da dritta (positiva da dritta verso sinistra);

- 180° corrisponde ad una forza da poppa (positiva da poppa verso prora);

- 270° corrisponde ad una forza da sinistra (positiva da sinistra verso dritta).

3.4.1 Caso statico

In questo primo scenario semplificativo si è scelto di ipotizzare che i disturbi ambientali provenissero tutti da un'unica direzione scelta a priori. Questo scenario semplificato è stato utilizzato per verificare la correttezza dei vari modelli che verranno poi analizzati in seguito. In particolare, per tutte e tre le strategie di risoluzione dell'allocazione di spinta, le forze ambientali sono state calcolate con le formule descritte precedentemente nel capitolo 3.2.1. In tabella 3.3 vengono riportati i dati di input per il calcolo dei disturbi ambientali.

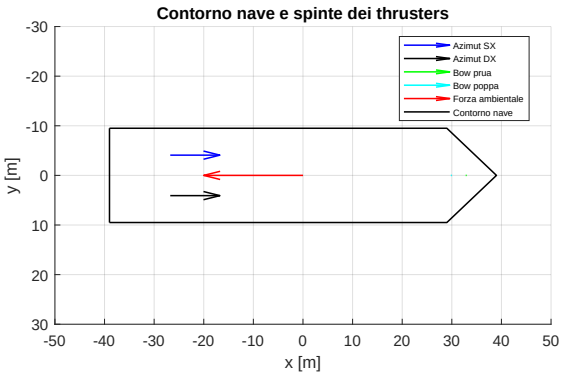
Velocità vento (m/s)	10
Area frontale esposta al vento (m^2)	442
Area longitudinale esposta al vento (m^2)	1037
Velocità corrente (m/s)	0.2
Area longitudinale immersa (m^2)	399
Area della figura di galleggiamento (m^2)	1188
Periodo dell'onda (s)	7.5
Altezza significativa dell'onda (m)	3

Tabella 3.3: *Dati iniziali per forze ambientali*

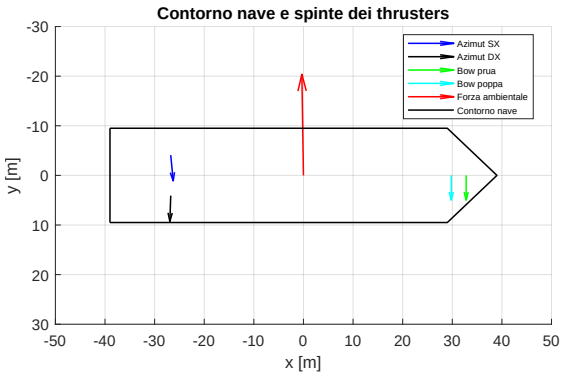
L'angolo di provenienza delle forze è stato prefissato e risulta essere uguale per il calcolo di tutte le forze ambientali (vento, onde e corrente): per verifcare la correttezza del codice sono stati sviluppati i più semplici quattro tentativi con quattro angoli di provenienza delle forze diversi (0°, 90°, 180°, 270°). L'obiettivo è quello di bilanciare i disturbi ambientali esterni calcolati con le spinte dei vari propulsori, utilizzando i tre metodi di allocazione della spinta descritti precedentemente nel capitolo 3.3. Questo caso costituisce un test di base semplice per confrontare e verificare l'efficienza delle tre strategie di allocazione implementate in una condizione stazionaria e controllata.
Si riportano di seguito i risultati ottenuti.

Risultati ottimizzazione

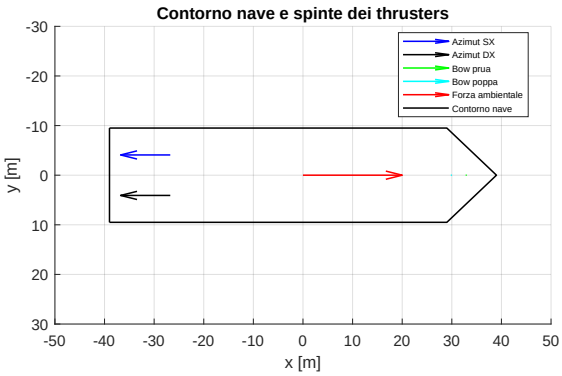
In figura 3.5 vengono riportati i risultati ottenuti con l'ottimizzazione vincolata nel caso statico con direzione di provenienza delle forze ambientali fissate a 0°, 90°, 180°, 270°.



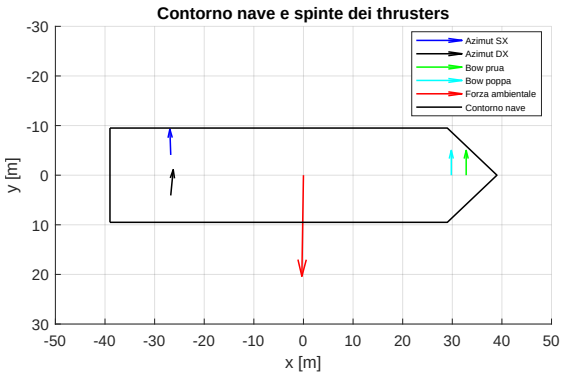
(a) Direzione forze a 0°



(b) Direzione forze a 90°



(c) Direzione forze a 180°



(d) Direzione forze a 270°

Figura 3.5: *Risultati caso statico con ottimizzazione*

Come da aspettative, le spinte hanno sempre verso opposto rispetto al vettore delle forze ambientali perchè queste ultime devono essere compensate. La spinta dei *bow thruster* si ha solo nel caso in cui le forze ambientali sono al traverso e ciò permette di distribuire le spinte su quattro propulsori e non solo sui due propulsori azimutali. Si riporta anche una tabella riassuntiva delle spinte dei vari propulsori nelle loro rispettive coordinate e delle forze ambientali per verificare che i distrubi esterni siano compensati nel modo corretto dalle spinte determinate. In tabella 3.4 vengono riportati i risultati numerici delle forze ambientali e delle coordinate delle spinte dei vari propulsori ottenuti con l'ottimizzazione vincolata nel caso statico.

X_{env} (kN)	-30.9
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	15.4
Y_{azimutsx} (kN)	$10^{-}8$
X_{azimutdx} (kN)	15.4
Y_{azimutdx} (kN)	$10^{-}8$
T_{bow} (kN)	$10^{-}9$

(a) *Forze ambientali a 0° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	-128
X_{azimutsx} (kN)	3.13
Y_{azimutsx} (kN)	32.6
X_{azimutdx} (kN)	-1.12
Y_{azimutdx} (kN)	32.6
T_{bow} (kN)	62.8

(b) *Forze ambientali a 90° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	30.4
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	-15.2
Y_{azimutsx} (kN)	$10^{-}7$
X_{azimutdx} (kN)	-15.2
Y_{azimutdx} (kN)	$10^{-}7$
T_{bow} (kN)	$10^{-}9$

(c) *Forze ambientali a 180° e spinte ottenute*

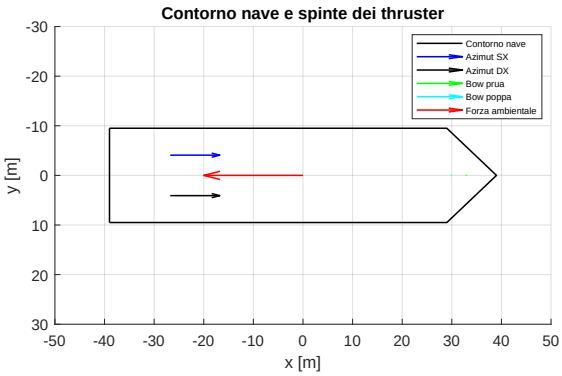
X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	128
X_{azimutsx} (kN)	-1.12
Y_{azimutsx} (kN)	-32.6
X_{azimutdx} (kN)	3.13
Y_{azimutdx} (kN)	-32.6
T_{bow} (kN)	-62.8

(d) *Forze ambientali a 270° e spinte ottenute*

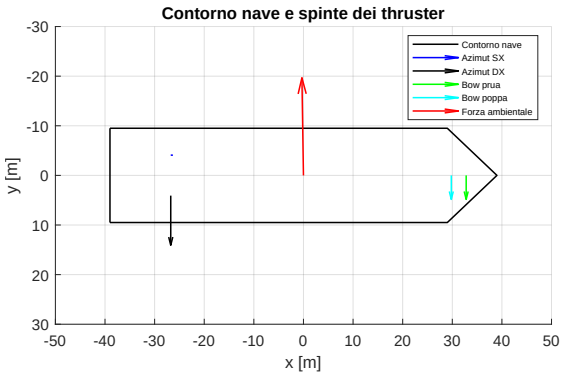
Tabella 3.4: *Risultati caso statico con ottimizzazione*

Risultati assi fissi

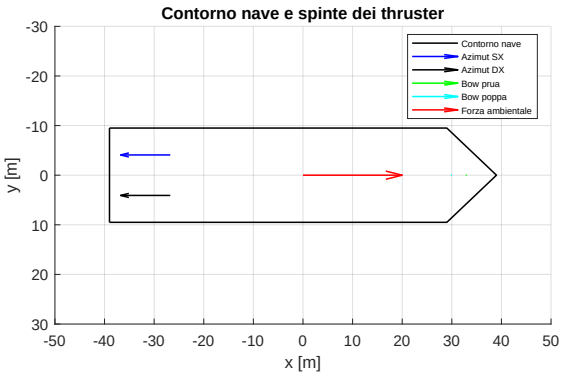
In figura 3.6 vengono riportati i risultati ottenuti con la strategia degli assi fissi nel caso statico con direzione di provenienza delle forze ambientali fissate a 0°, 90°, 180°, 270°.



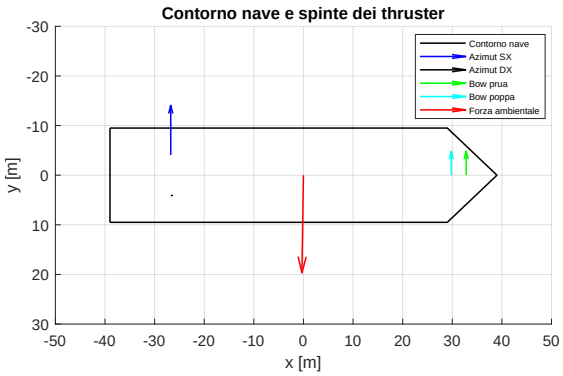
(a) Direzione forze a 0°



(b) Direzione forze a 90°



(c) Direzione forze a 180°



(d) Direzione forze a 270°

Figura 3.6: *Risultati caso statico con assi fissi*

Come si può notare, l'algoritmo per la scelta dell'allocazione è corretto in quanto i due propulsori azimutali non spingono mai uno contro l'altro. In particolare nei casi di 0° e 180°, la strategia sviluppata è quella in cui entrambi i propulsori azimutali sono orientati a 0°/180° in quanto le forze ambientali hanno componente trasversale e di momento nulle. Negli altri due casi, ovvero quando le componenti preponderanti delle forze ambientali sono traversali, un propulsore azimutale è ruotato per aiutare i *bow thruster* a compensare i disturbi, mentre l'altro è posto a 0° con spinta praticamente nulla.
Si riporta anche una tabella riassuntiva delle spinte dei vari propulsori nelle loro rispettive coordinate e delle forze ambientali per verificare che i distrubi esterni siano compensati nel modo corretto dalle spinte determinate. In tabella 3.5 vengono riportati i risultati numerici delle forze ambientali e delle coordinate delle spinte dei vari propulsori ottenuti con la strategia degli assi fissi nel caso statico.

X_{env} (kN)	-30.9
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	15.4
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	15.4
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(a) *Forze ambientali a 0° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	-128
X_{azimutsx} (kN)	2.01
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	0
Y_{azimutdx} (kN)	65.1
T_{bow} (kN)	63

(b) *Forze ambientali a 90° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	30.4
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	-15.2
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	-15.2
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(c) *Forze ambientali a 180° e spinte ottenute*

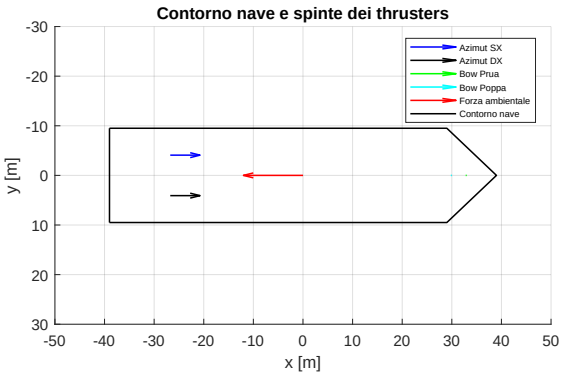
X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	128
X_{azimutsx} (kN)	0
Y_{azimutsx} (kN)	-65.1
X_{azimutdx} (kN)	2.01
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	-63

(d) *Forze ambientali a 270° e spinte ottenute*

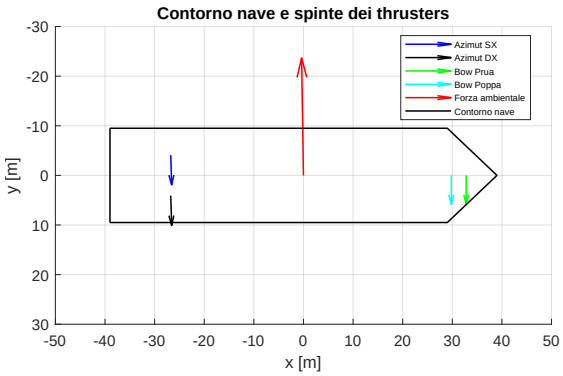
Tabella 3.5: *Risultati caso statico con assi fissi*

Risultati direzione fissata

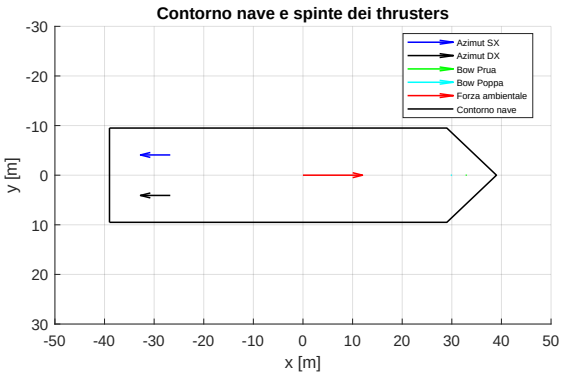
In figura 3.7 vengono riportati i risultati ottenuti con la strategia della direzione fissata nel caso statico con direzione di provenienza delle forze ambientali fissate a 0°, 90°, 180°, 270°.



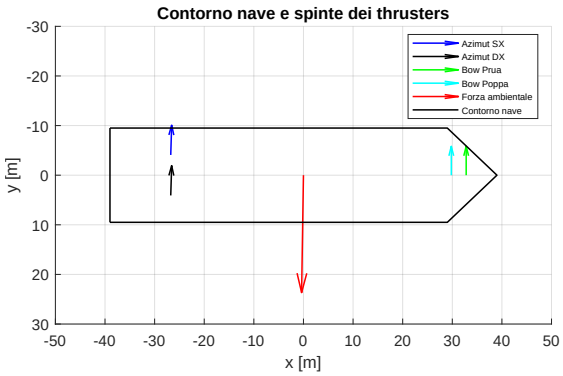
(a) Direzione forze a 0°



(b) Direzione forze a 90°



(c) Direzione forze a 180°



(d) Direzione forze a 270°

Figura 3.7: *Risultati caso statico con direzione fissata*

I risultati ottenuti sono coerenti in quanto i due propulsori azimutali sono ruotati rispetto all'asse verticale con lo stesso angolo e quindi spingono nella stessa direzione. Come ci si aspettava questo risultato è molto simile a quello ottenuto con l'ottimizzazione vincolata, in quanto la funzione obiettivo è quella di minimizzare la spinta totale dei propulsori e quindi i due propulsori azimutali, sebbene con angoli diversi, tendono a spingere approssimativamente nella stessa direzione.
Si riporta anche una tabella riassuntiva delle spinte dei vari propulsori nelle loro rispettive coordinate e delle forze ambientali per verificare che i distrubi esterni siano compensati nel modo corretto dalle spinte determinate. In tabella 3.6 vengono riportati i risultati numerici delle forze ambientali e delle coordinate delle spinte dei vari propulsori ottenuti con la strategia della direzione fissata nel caso statico.

X_{env} (kN)	-30.9
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	15.4
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	15.4
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(a) *Forze ambientali a 0° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	-128
X_{azimutsx} (kN)	1.0
Y_{azimutsx} (kN)	32.5
X_{azimutdx} (kN)	1.01
Y_{azimutdx} (kN)	32.5
T_{bow} (kN)	63.1

(b) *Forze ambientali a 90° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	30.4
Y_{env} (kN)	0
X_{azimutsx} (kN)	-15.2
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	-15.2
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(c) *Forze ambientali a 180° e spinte ottenute*

X_{env} (kN)	-2.01
Y_{env} (kN)	128
X_{azimutsx} (kN)	1.00
Y_{azimutsx} (kN)	-32.5
X_{azimutdx} (kN)	1.01
Y_{azimutdx} (kN)	-32.5
T_{bow} (kN)	-63.1

(d) *Forze ambientali a 270° e spinte ottenute*

Tabella 3.6: *Risultati caso statico con direzione fissata*

3.4.2 Caso di analisi direzionale

In questo secondo scenario operativo si è scelto di far variare l'angolo di direzione delle forze ambientali con direzione che varia tra 0° e 360° con step costante di 5°, supponendo, però, che le forze vengano calcolate con lo stesso angolo di direzione di provenienza dei disturbi (vento, onde e corrente) per ogni step. Lo scopo è quello di risolvere il problema di allocazione della spinta per tutte e tre le strategie implementate e per ciascun angolo dei disturbi esterni. In figura 3.8 si riporta l'andamento delle forze ambientali calcolate in funzione dell'angolo di provenienza.

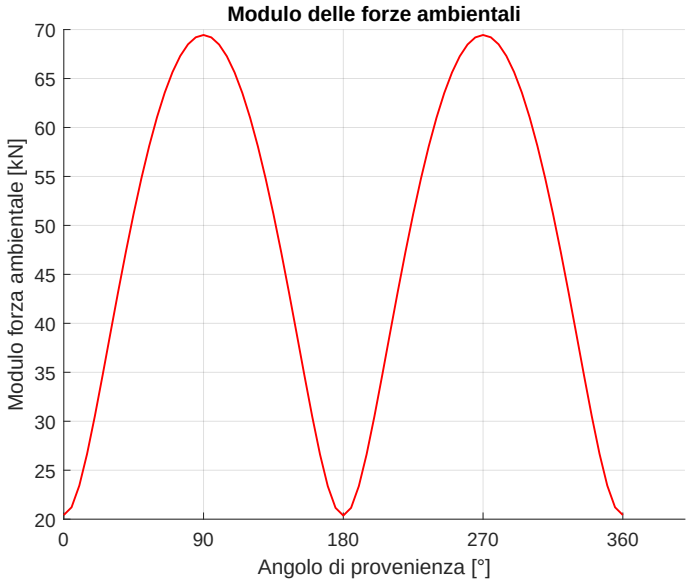


Figura 3.8: *Forze ambientali in funzione dell'angolo di provenienza*

I risultati ottenuti sono stati riportati sotto forma di grafici in coordinate polari dove vengono rappresentate le somme dei moduli delle spinte dei vari propulsori per ogni angolo di provenienza dei disturbi esterni.
Anche in questo caso per tutte le strategie implementate (ottimizzazione, direzione fissata e assi fissi), le forze ambientali sono state calcolate con le formule definite precedentemente nel capitolo 3.2.1 e i dati di input utilizzati sono gli stessi del caso precedente riportati in tabella 3.3.
In figura 3.9, 3.10 e 3.11 si riportano i diagrammi polari delle somme dei moduli delle spinte dei vari propulsori in kN ottenute mediante, rispettivamente, la strategia di ottimizzazione vincolata, direzione fissata e assi fissi.

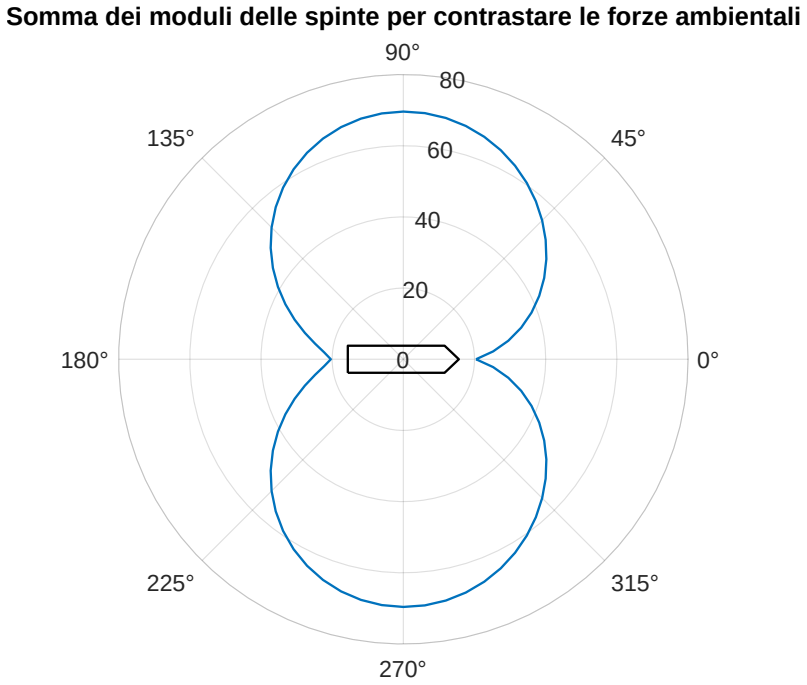


Figura 3.9: *Risultato ottenuto con ottimizzazione*

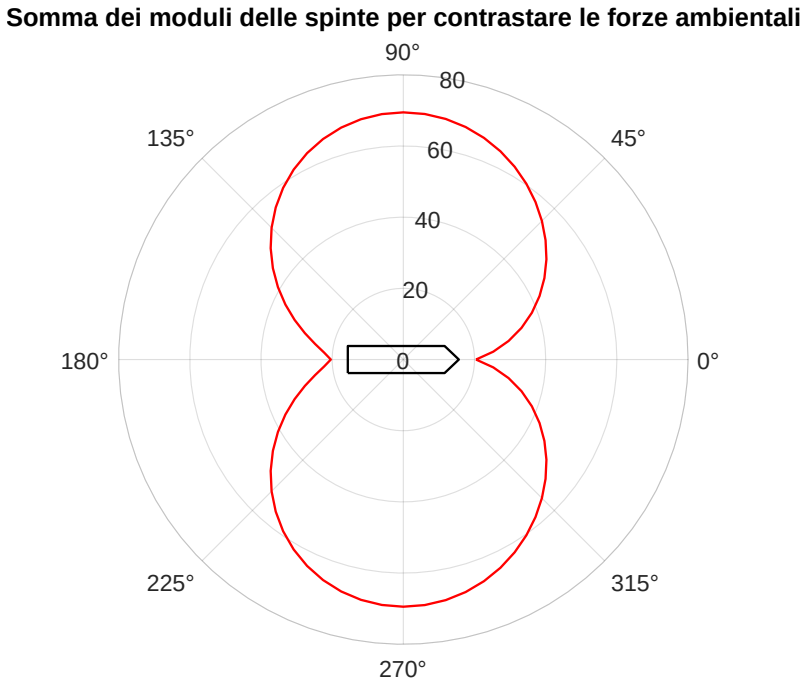


Figura 3.10: *Risultato ottenuto con direzione fissata*

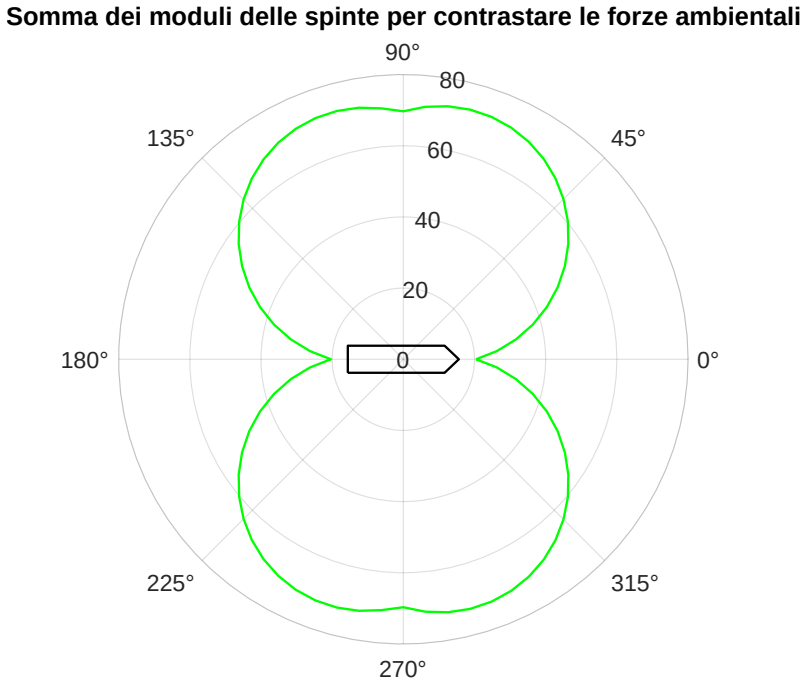


Figura 3.11: *Risultato ottenuto con assi fissi*

In figura 3.12 si riporta, invece, un diagramma polare dove vengono riportati i tre risultati sovrapposti in modo da evidenziare meglio le differenze tra le tre strategie di risoluzione di allocazione della spinta implementate.

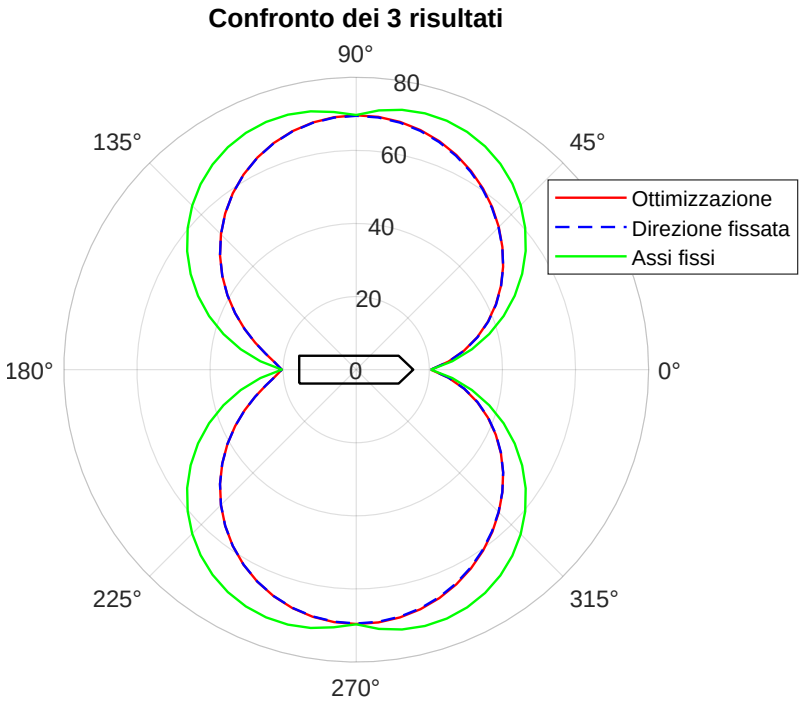


Figura 3.12: *Confronto dei risultati con le tre strategie*

Come si può notare dalle figure precedenti, in tutte le strategie di allocazione implementate si ottengono dei diagrammi polari a forma di "8": questo andamento è coerente con quanto ci si aspetta e rappresenta la somma dei moduli delle spinte richieste dal sistema di posizionamento dinamico per contrastare le forze ambientali in funzione della loro direzione di provenienza.
In particolare sono presenti due minimi nel momento in cui le forze ambientali provengono da 0° o da 180°, cioè quando le forze ambientali sono lungo l'asse longitudinale della nave: questo risultato è dovuto al fatto che, in direzione longitudinale, i due propulsori azimutali sono molto efficienti e possono quindi generare direttamente la spinta necessaria.
Al contrario, si hanno due massimi quando le forze provengono da 90° o da 270°, cioè quando i disturbi esterni agiscono in direzione trasversale: questo è dovuto al fatto che, in direzione trasversale, è necessario combinare la spinta di più proprulsori (oltre ai due azimutali, si sfruttano anche i due *bow thruster*) orientati, però, in modo meno favorevole e quindi meno efficienti; per questo motivo occorre maggiore intensità complessiva per generare la spinta richiesta.
Si può vedere dalla figura 3.12 che i diagrammi polari relativi alle soluzioni ottenute con ottimizzazione e direzione fissata, risultano essere molto simili tra loro: ciò è dovuto al fatto che l'obiettivo dell'ottimizazzione è quello di minimizzare la spinta dei vari propulsori e quindi la soluzione ottimizzata che si ottiene prevede di avere i due propulsori azimutali che spingono più o meno con lo stesso angolo di rotazione, cioè in maniera molto simile alla strategia di direzione fissata. Nel caso di assi fissi, invece, i propulsori azimutali sono vincolati a spingere lungo assi ortogonali fissati (0° o 90°). Questo vincolo produce una ridotta flessibilità, soprattutto nel momento in cui le forze ambientali provengono in direzione obliqua (ad esempio 45°): in tali direzioni, è necessario quindi combinare spinte elevate da entrambi i propulsori azimutali per ottenere una spinta risultante obliqua, aumentando così la somma dei moduli delle spinte.
Di conseguenza, il diagramma polare mostra picchi localizzati nei quadranti diagonali, ovvero dove i propulsori lavorano al massimo, e minimi quando la forza ambientale è allineata con uno degli assi fissi.

3.4.3 Caso realistico

In questo test si analizzano alcuni casi realistici dove vengono generate delle storie temporali riguardanti la velcoità e la direzione del vento e della corrente, oltre che quelle riguardanti ad altezza significativa, periodo e direzione delle onde. A partire da questi dati vengono ricavate le forze ambientali di vento, onde e corrente istante per istante: queste forze vengono sempre calcolate con le formule definite precedentemente nel capitolo 3.2.1.
In particolare, per validare questo test sono stati considerati tre casi diversi:

- il caso in cui direzione di vento, onde e corrente hanno un valor medio di 270°;
- il caso in cui direzione di vento, onde e corrente hanno un valor medio di 180°;
- il caso in cui direzione di vento, onde e corrente hanno un valor medio di 45°.

Per semplicità, per questi tre casi diversi di direzione di provenienza dei disturbi esterni, si è considerata la stessa storia temporale di velocità del vento e della corrente e di altezza significativa e periodo d'onda.In figura 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 vengono riportate rispettivamente le storie temporali di velocità del vento, velocità della corrente, periodo d'onda e altezza significativa delle onde.

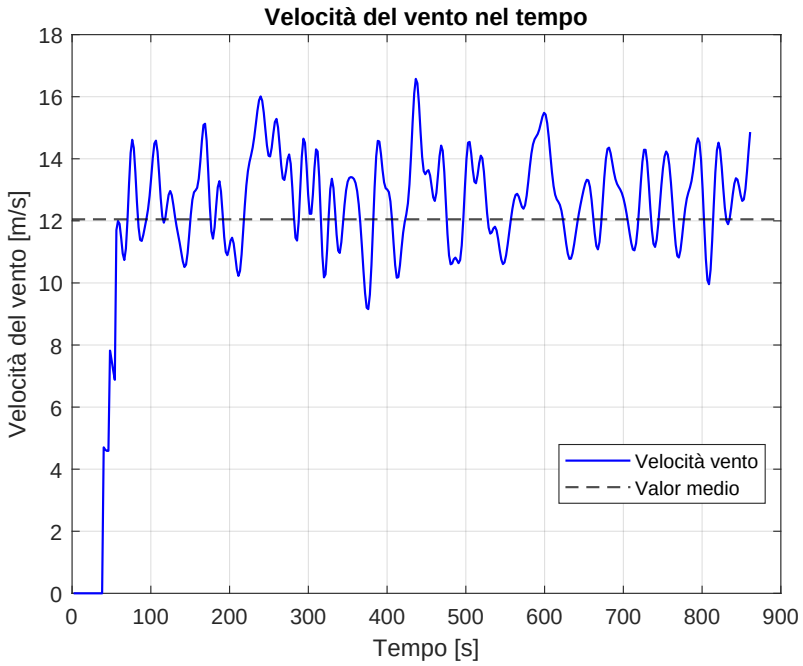


Figura 3.13: *Velocità del vento nel tempo*

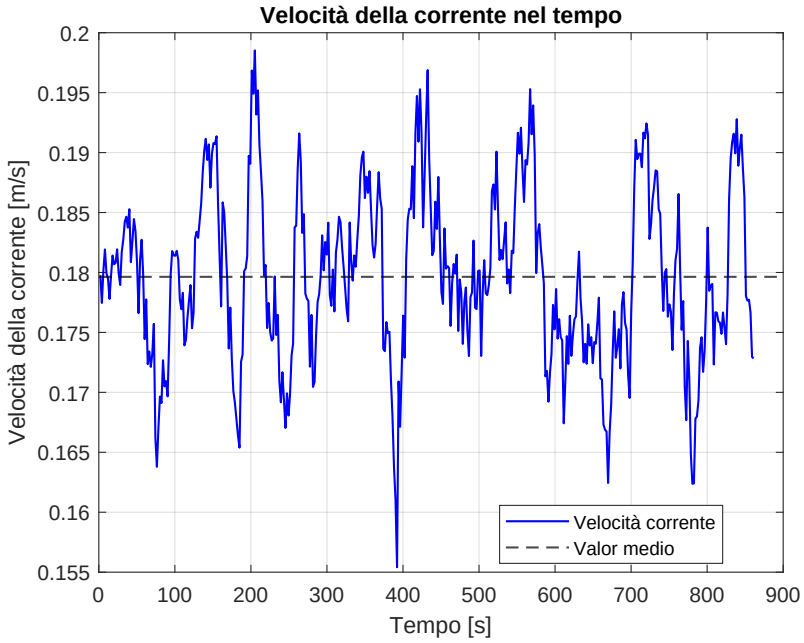


Figura 3.14: *Velocità della corrente nel tempo*

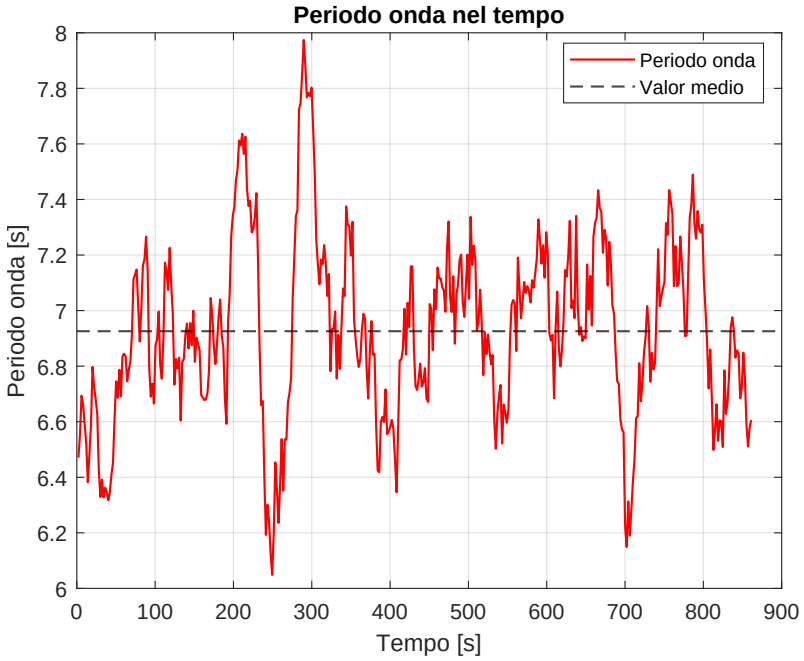


Figura 3.15: *Periodo delle onde nel tempo*

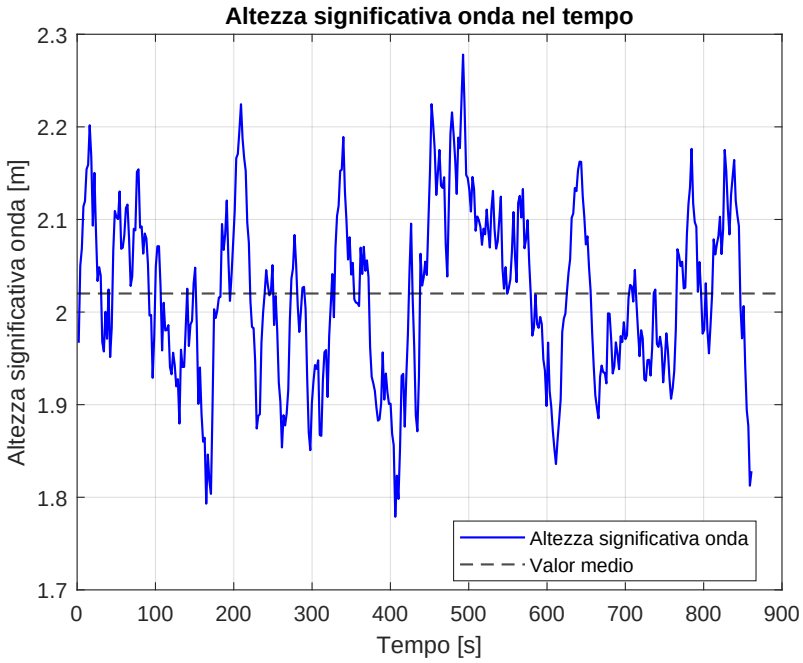


Figura 3.16: *Altezza significativa delle onde nel tempo*

In tabella 3.7 si riportano, inoltre, i valori medi dei segnali temporali appena definiti calcolati attraverso una media aritmetica.

Velocità vento (m/s)	12.05
Velocità corrente (m/s)	0.18
Periodo onde (s)	6.93
Altezza onde (m)	2.02

Tabella 3.7: *Valori medi dei segnali temporali*

Gli altri dati utilizzati per il calcolo dei disturbi esterni sono gli stessi riportati in tabella 3.3.
Dopo aver calcolato i disturbi ambientali nei tre casi di direzione di provenienza delle forze, è stato possibile risolvere il problema di allocazione della spinta istante per istante per ognuna delle tre strategie implementate (ottimizzazione, direzione fissata, assi fissi).
Si riportano nei paragrafi successivi i risultati ottenuti sottoforma di grafici e di tabelle riassuntive che riportano i valori medi delle varie storie temporali in modo da poter fare un'analisi comparativa tra le diverse strategie utilizzate.

Risultati con direzione forze 270°

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti nel caso di direzione di provenienza delle forze con media di 270°: in figura 3.17, 3.18, 3.19 vengono riportate le storie temporali di direzione del vento, della corrente e delle onde, mentre in figura 3.20 e 3.21 vengono riportate le forze ambientali totali lungo le coordinate x e y.

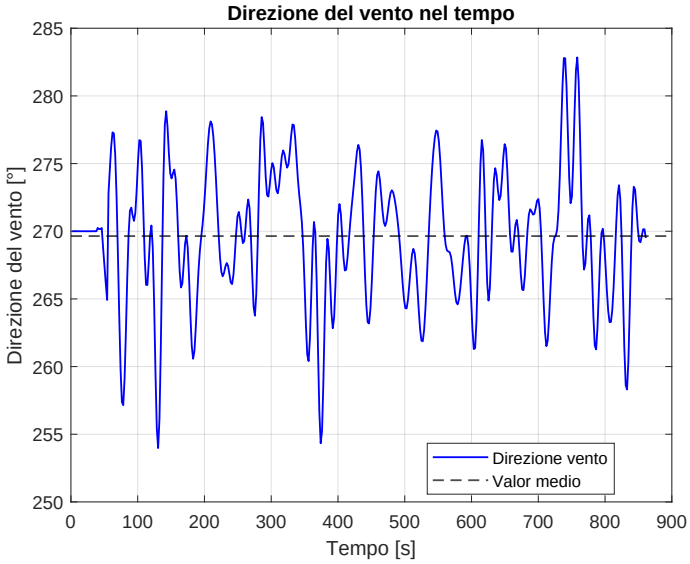


Figura 3.17: *Direzione del vento nel tempo nell'intorno di 270°*

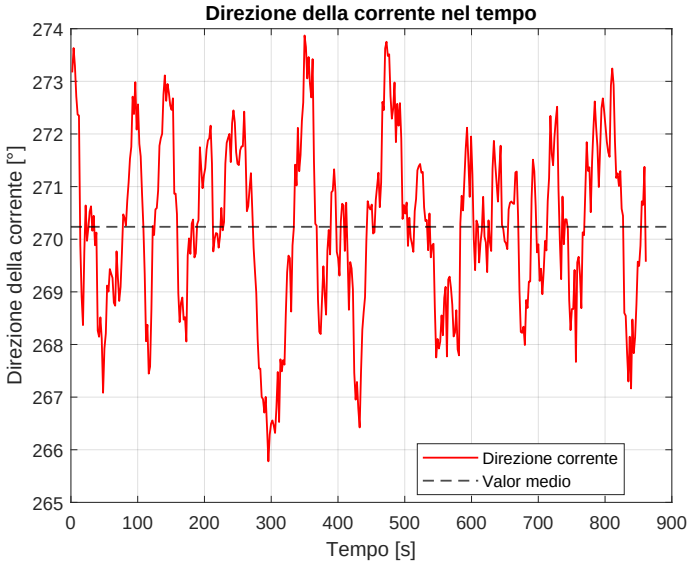


Figura 3.18: *Direzione della corrente nel tempo nell'intorno di 270°*

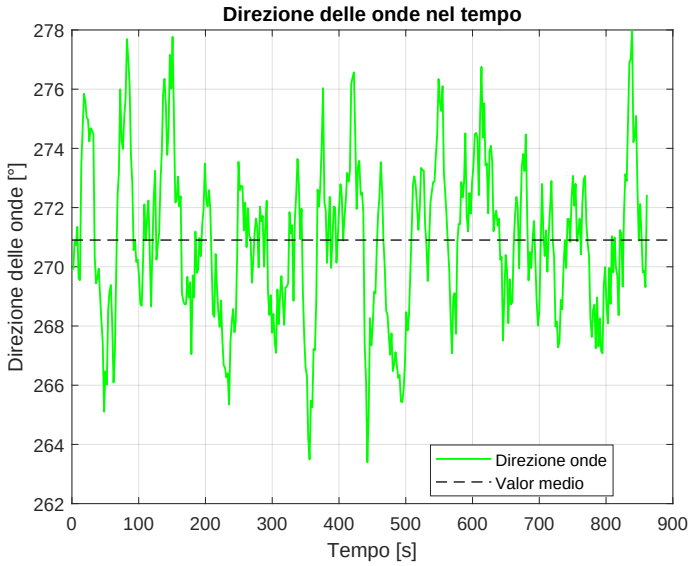


Figura 3.19: *Direzione delle onde nel tempo nell'intorno di 270°*

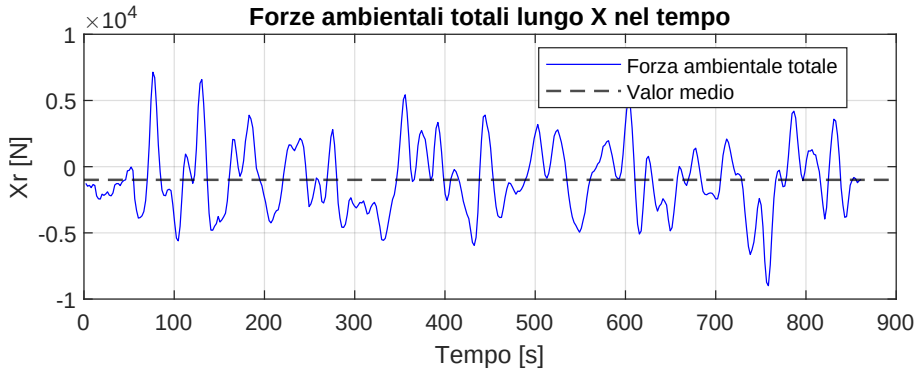


Figura 3.20: *Forze ambientali totali lungo x caso 270°*

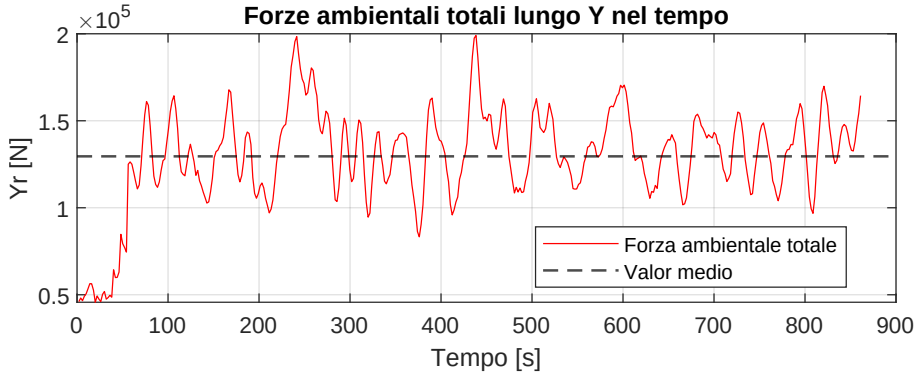


Figura 3.21: *Forze ambientali totali lungo y caso 270°*

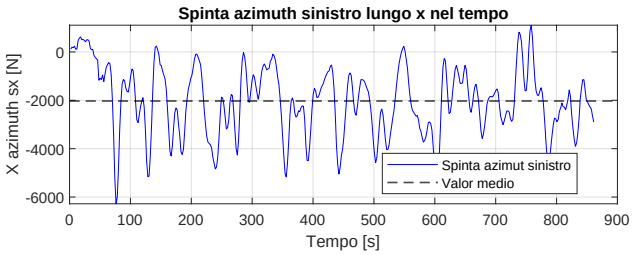
In tabella 3.8 vengono riportati i valori medi dei segnali temporali nel caso 270°.

Direzione vento (deg)	269.64
Direzione corrente (deg)	270.24
Direzione onde (deg)	270.9
Forze ambientali totali lungo x (kN)	-0.99
Forze ambientali totali lungo y (kN)	129.6

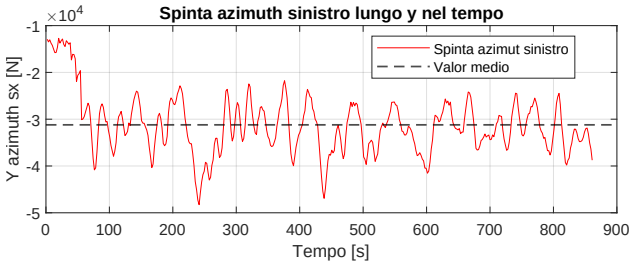
Tabella 3.8: *Valori medi dei segnali temporali nel caso 270°*

Risultati ottimizzazione caso 270°

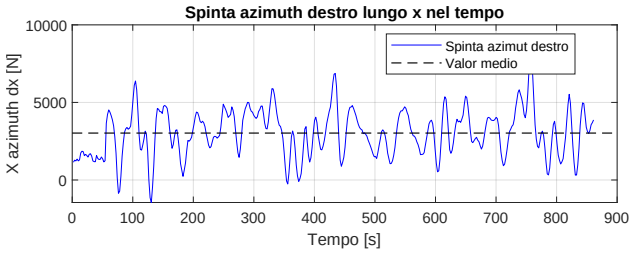
Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di ottimizzazione vincolata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 270°. In particolare in figura 3.22 viene riportata la spinta dei due propulsori azimutali lungo le due coordinate x e y, in figura 3.23 viene riportata la spinta di un solo *bow thruster*, in figura 3.24 viene riportato l'angolo di rotazione di ognuno dei due propulsori azimutali e in figura 3.25 viene riportato l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



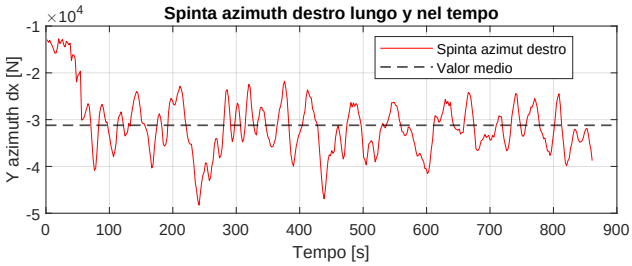
(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*



(b) *Spinta azimut sinistro lungo y*



(c) *Spinta azimut destro lungo x*



(d) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 3.22: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

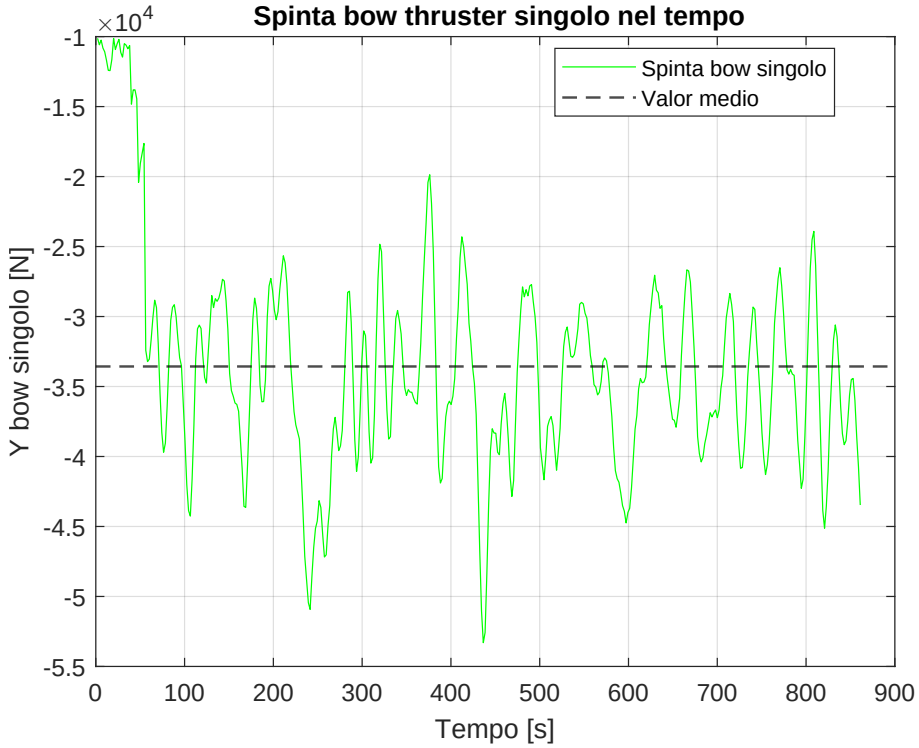
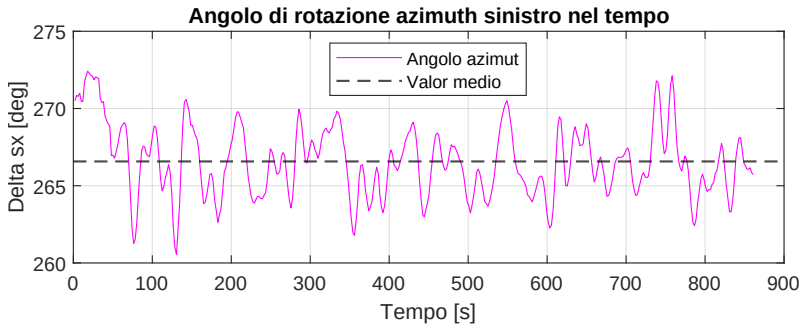
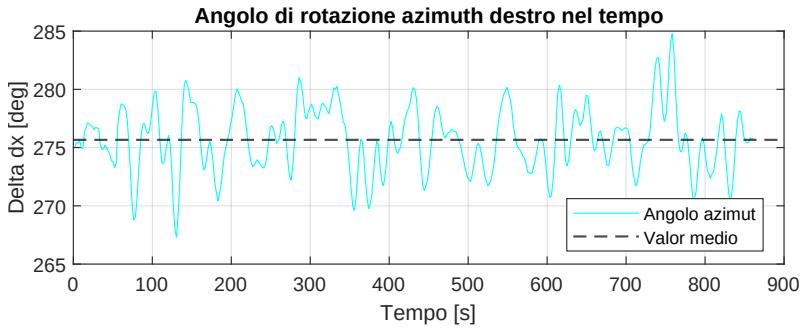


Figura 3.23: *Spinta bow thruster singolo*

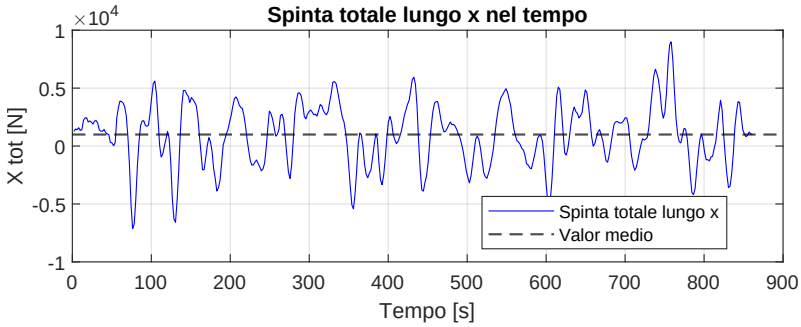


(a) *Angolo di rotazione azimut sinistro*

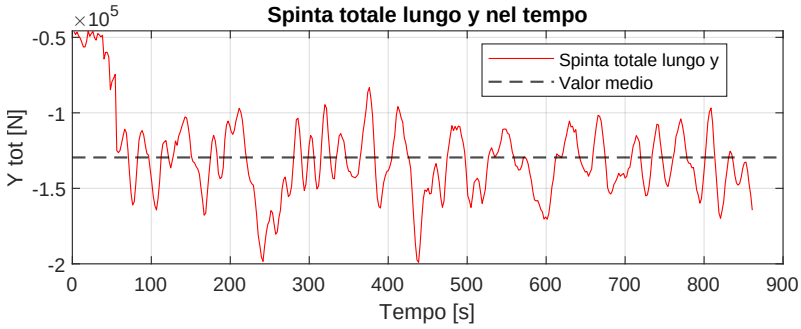


(b) *Angolo di rotazione azimut destro*

Figura 3.24: *Andamento angoli di rotazione degli azimut nel tempo*



(a) *Spinta totale lungo x nel tempo*



(b) *Spinta totale lungo y nel tempo*

Figura 3.25: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

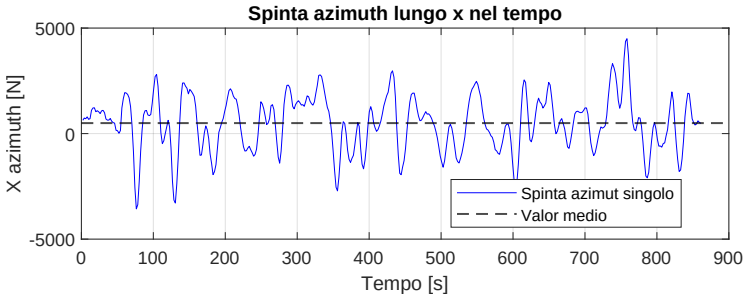
In tabella 3.9 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione vincolata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 270°.

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	−2.03
Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	−31.2
Spinta azimut destro lungo x (kN)	3.02
Spinta azimut destro lungo y (kN)	−31.2
Spinta bow thruster singolo (kN)	−33.6
Angolo di rotazione azimut sinistro (deg)	266.57
Angolo di rotazione azimut destro (deg)	275.66
Spinta totale lungo x (kN)	0.99
Spinta totale lungo y (kN)	−129.6

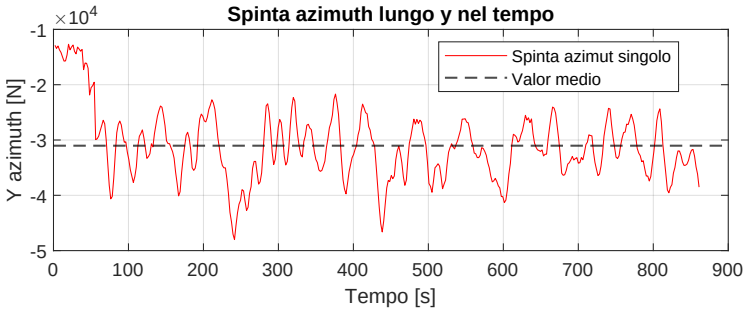
Tabella 3.9: *Valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione nel caso 270°*

Risultati direzione fissata caso 270°

Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di direzione fissata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 270°. In particolare, in figura 3.26 si riporta la spinta di un singolo propulsore azimutale lungo le due coordinate x e y, in figura 3.27 la spinta di un singolo bow thruster, in figura 3.28 l'angolo di rotazione dei propulsori azimutali e in figura 3.29 l'andamento della somma delle spinte dei propulsori lungo le due coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut lungo x*



(b) *Spinta azimut lungo y*

Figura 3.26: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

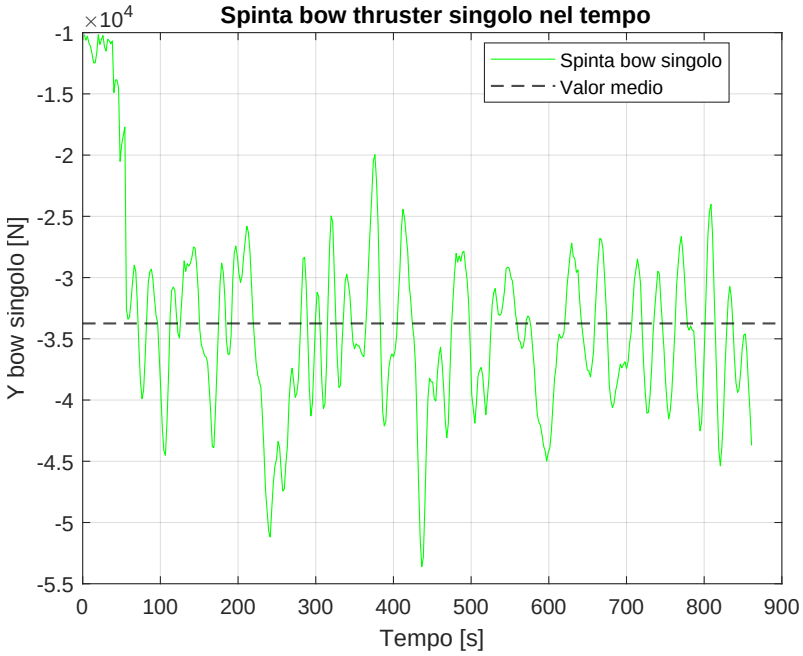


Figura 3.27: *Spinta bow thruster singolo*

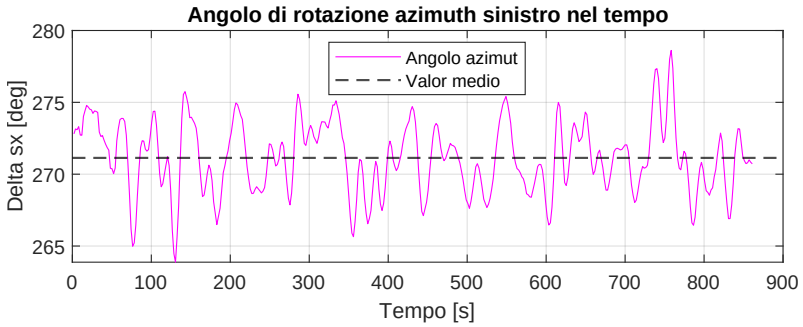
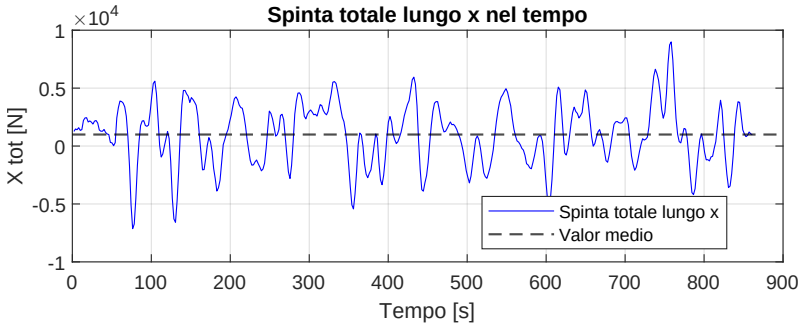
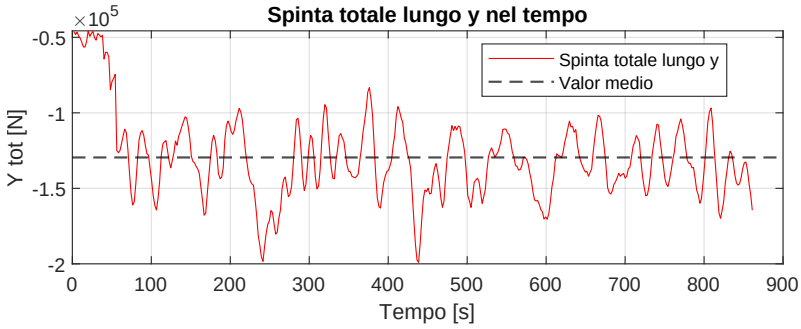


Figura 3.28: *Angolo di rotazione azimut*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.29: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

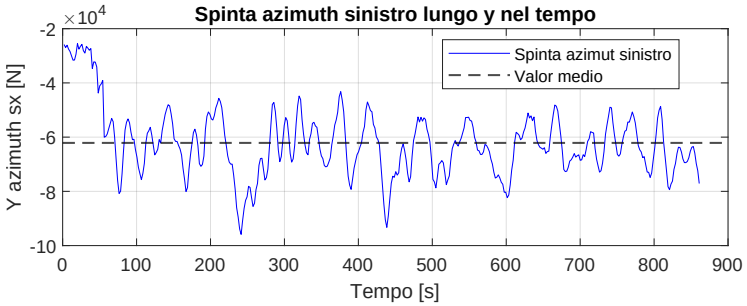
In tabella 3.10 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 270°.

Spinta azimut singolo lungo x (kN)	0.5
Spinta azimut singolo lungo y (kN)	−31.1
Spinta bow thruster singolo (kN)	−33.7
Angolo di rotazione azimut (deg)	271.13
Spinta totale lungo x (kN)	0.99
Spinta totale lungo y (kN)	−129.6

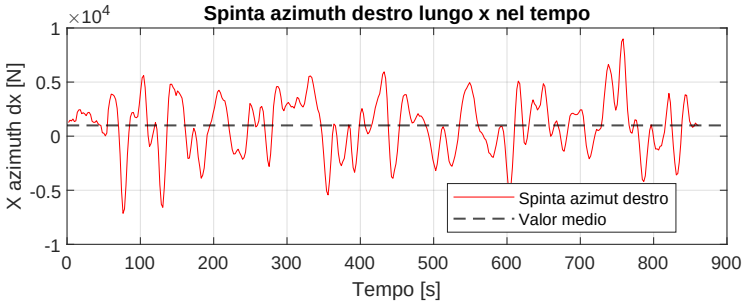
Tabella 3.10: *Valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso 270°*

Risultati assi fissi caso 270°

Come da aspettative, essendo i disturbi ambientali provenienti da sinistra verso dritta, la scelta dell'allocazione ricade nel caso in cui l'azimut sinistro è ruotato di 270° mentre quello destro rimane fisso a 0° per compensare le forze longitudinali. Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di assi fissi nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 270°. In particolare, in figura 3.30 si riporta la spinta dei due singoli propulsori azimutali lungo le coordinate x e y, in figura 3.31 la spinta di un singolo *bow thruster* e in figura 3.32 l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut sinistro lungo y*



(b) *Spinta azimut destro lungo x*

Figura 3.30: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

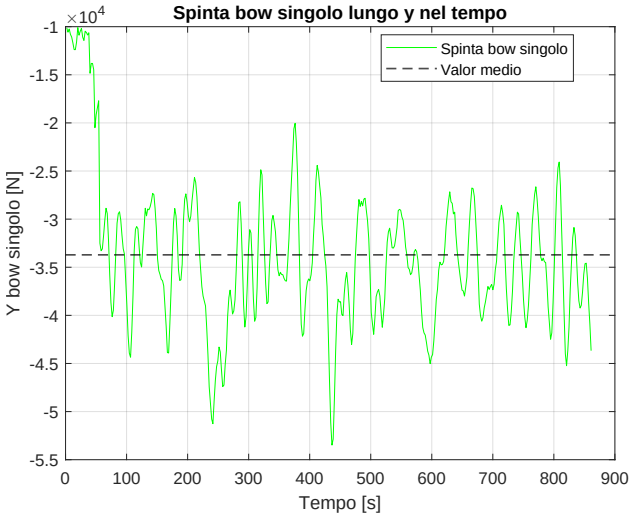
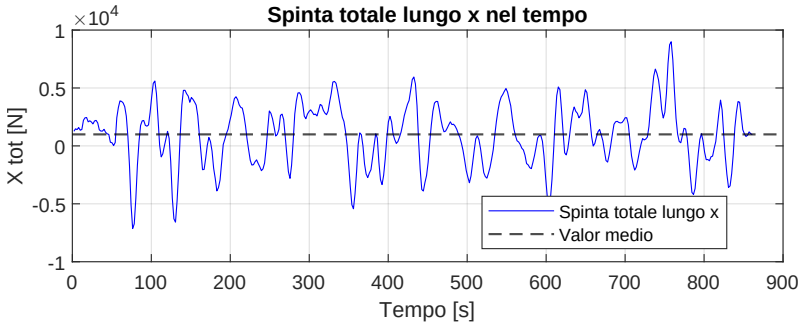
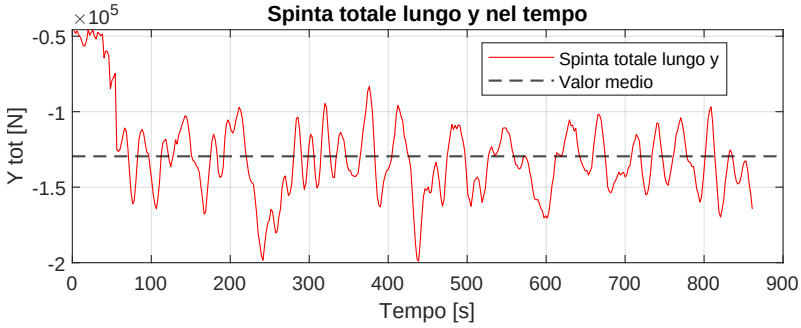


Figura 3.31: *Spinta bow thruster singolo*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.32: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

In tabella 3.11 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 270°.

Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	−62.1
Spinta azimut destro lungo x (kN)	0.99
Spinta bow thruster singolo (kN)	−33.7
Spinta totale lungo x (kN)	0.99
Spinta totale lungo y (kN)	−129.6

Tabella 3.11: *Valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso 270°*

Risultati con direzione forze 180°

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti nel caso di direzione di provenienza delle forze con media di 180°: in figura 3.33, 3.34, 3.35 vengono riportate le storie temporali di direzione del vento, della corrente e delle onde, mentre in figura 3.36 e 3.37 vengono riportate le forze ambientali totali lungo le coordinate x e y.

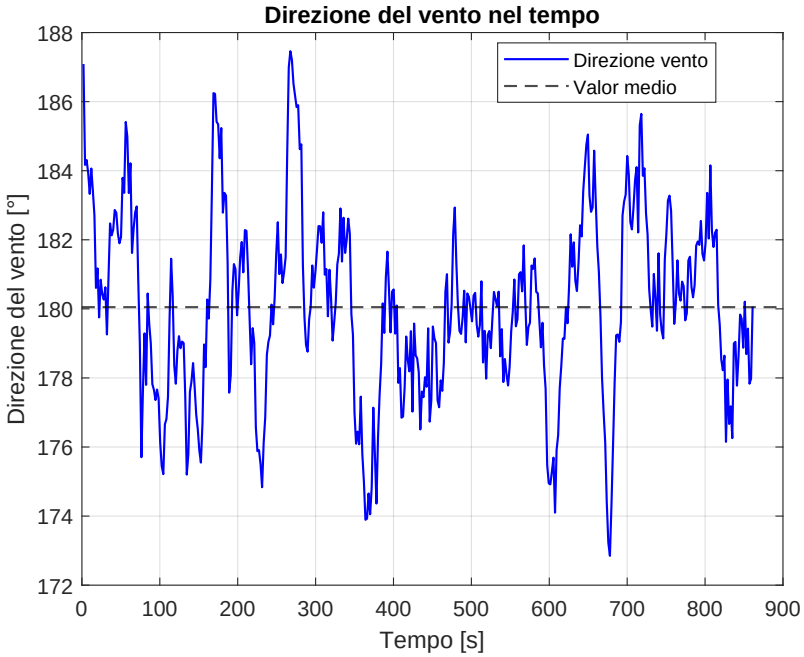


Figura 3.33: *Direzione del vento nel tempo nell'intorno di 180°*

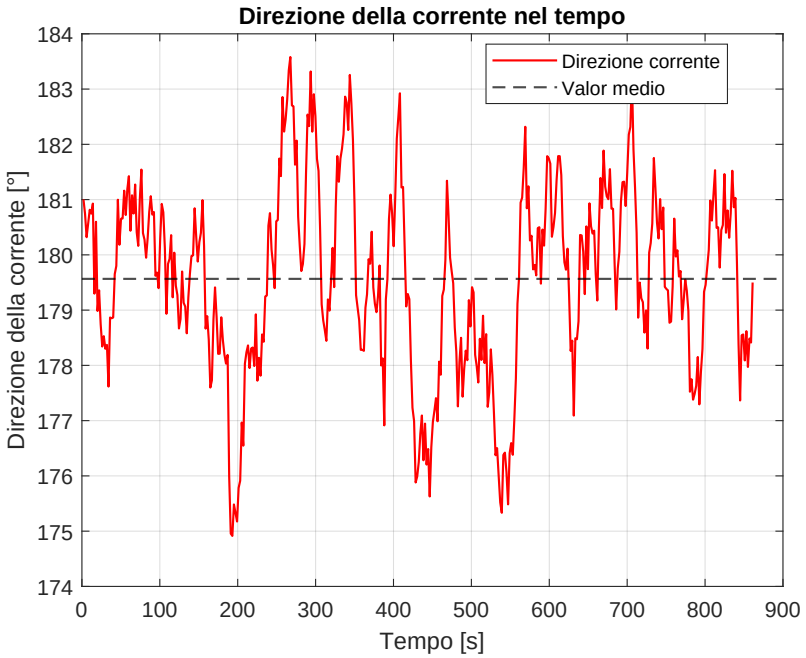


Figura 3.34: *Direzione della corrente nel tempo nell'intorno di 180°*

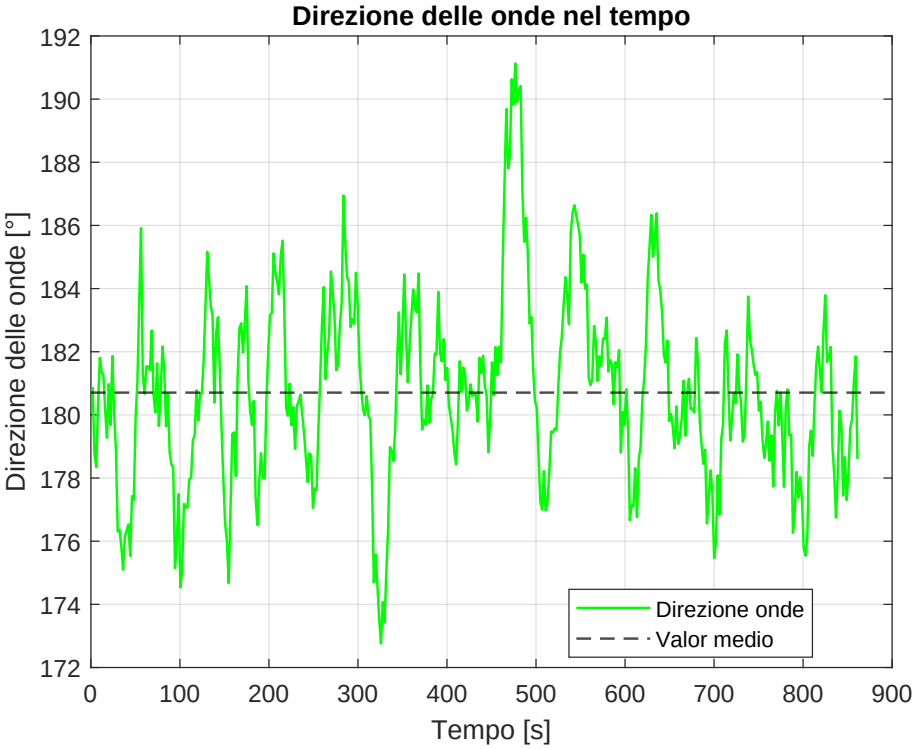


Figura 3.35: *Direzione delle onde nel tempo nell'intorno di 180°*

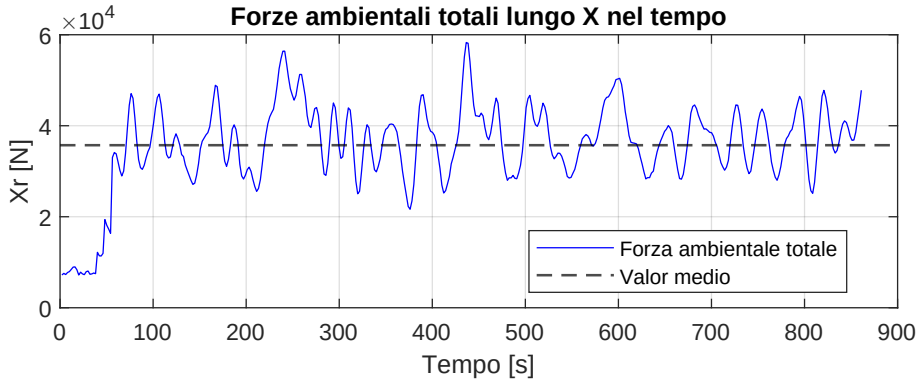


Figura 3.36: *Forze ambientali totali lungo x caso 180°*

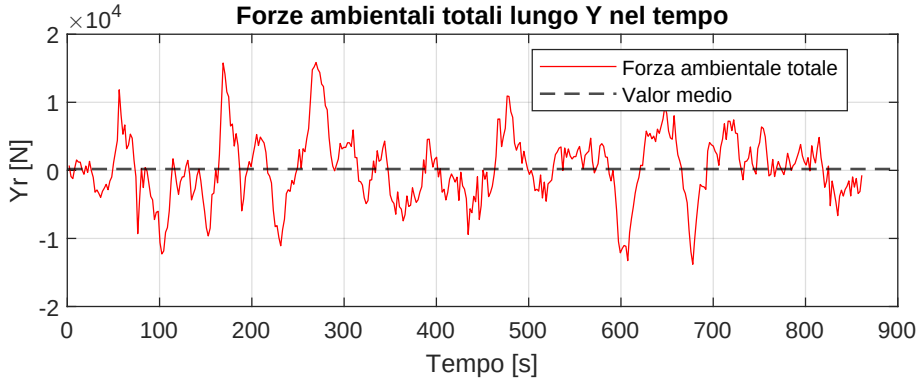


Figura 3.37: *Forze ambientali totali lungo y caso 180°*

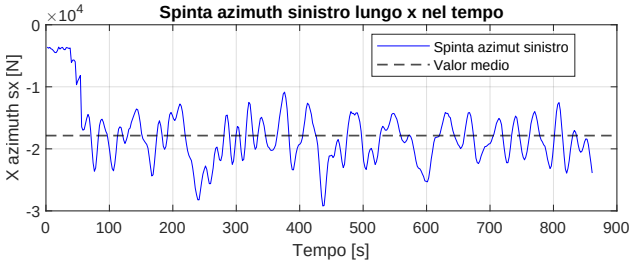
In tabella 3.12 vengono riportati i valori medi dei segnali temporali nel caso 180°.

Direzione vento (deg)	180.05
Direzione corrente (deg)	179.57
Direzione onde (deg)	180.71
Forze ambientali totali lungo x (kN)	35.7
Forze ambientali totali lungo y (kN)	0.2

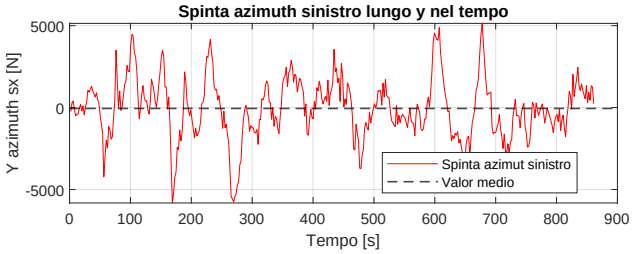
Tabella 3.12: *Valori medi dei segnali temporali nel caso 180°*

Risultati ottimizzazione caso 180°

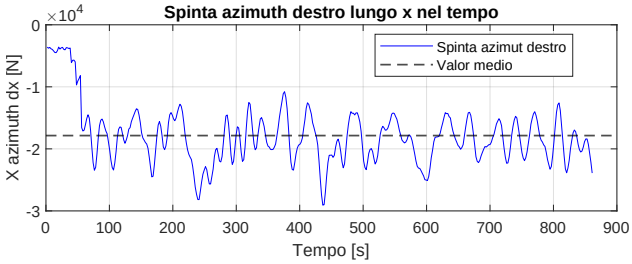
Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di ottimizzazione vincolata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 180°. In particolare in figura 3.38 viene riportata la spinta dei due propulsori azimutali lungo le due coordinate x e y, in figura 3.39 la spinta di un solo *bow thruster*, in figura 3.40 l'angolo di rotazione di ognuno dei due propulsori azimutali e in figura 3.41 l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



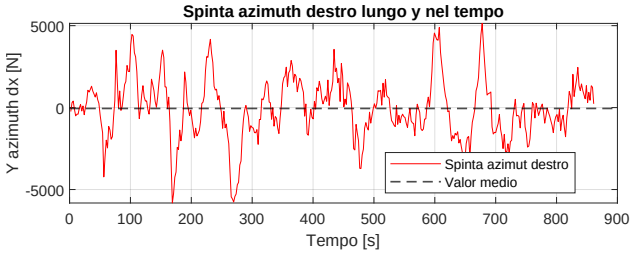
(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*



(b) *Spinta azimut sinistro lungo y*



(c) *Spinta azimut destro lungo x*



(d) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 3.38: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

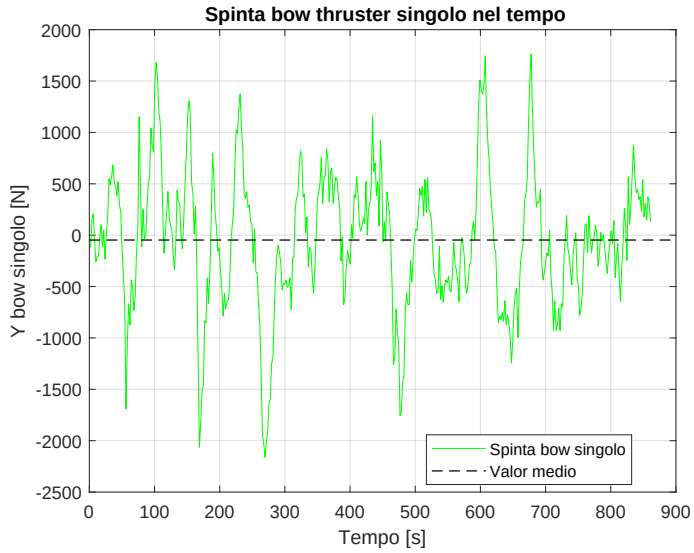
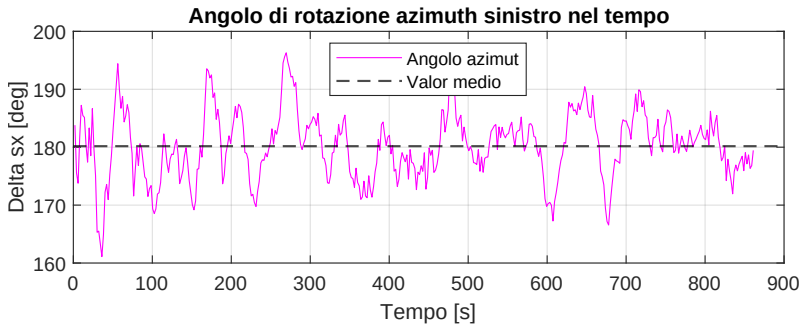
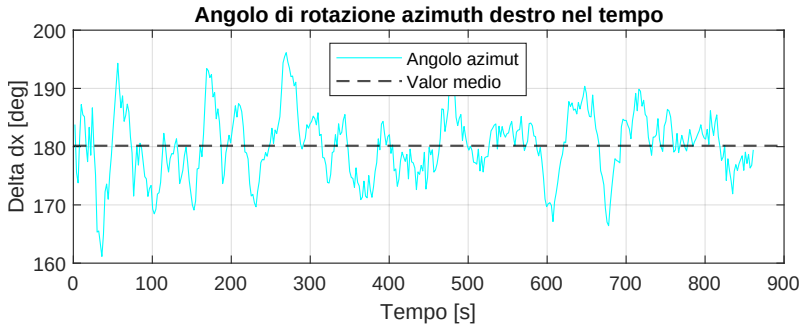


Figura 3.39: *Spinta bow thruster singolo*

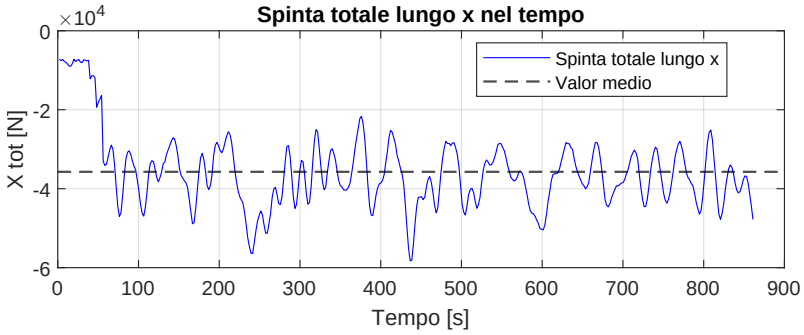


(a) *Angolo di rotazione azimut sinistro*

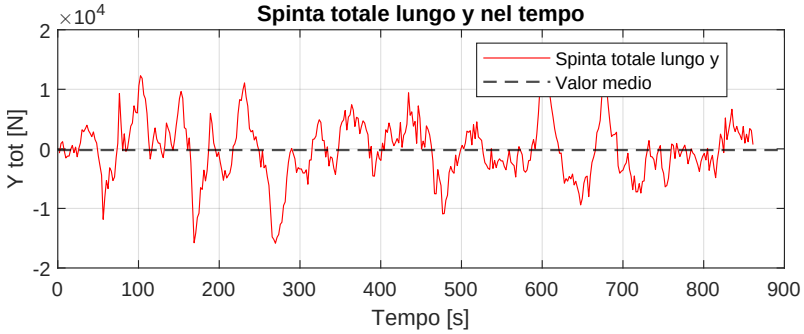


(b) *Angolo di rotazione azimut destro*

Figura 3.40: *Andamento angoli di rotazione degli azimut nel tempo*



(a) *Spinta totale lungo x nel tempo*



(b) *Spinta totale lungo y nel tempo*

Figura 3.41: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

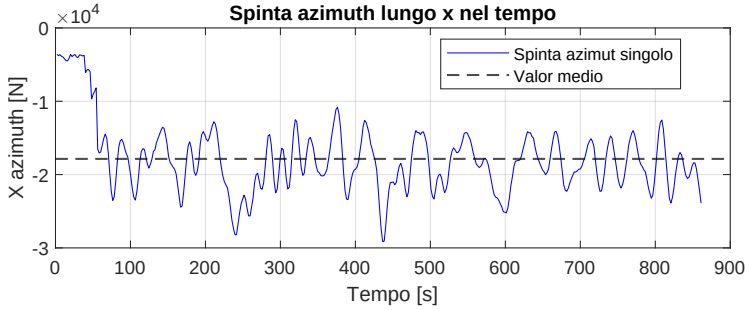
In tabella 3.13 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione vincolata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 180°.

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	-17.9
Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	-0.05
Spinta azimut destro lungo x (kN)	-17.9
Spinta azimut destro lungo y (kN)	-0.05
Spinta bow thruster singolo)(kN)	-0.05
Angolo di rotazione azimut sinistro (deg)	180.17
Angolo di rotazione azimut destro (deg)	180.15
Spinta totale lungo x (kN)	-35.7
Spinta totale lungo y (kN)	-0.2

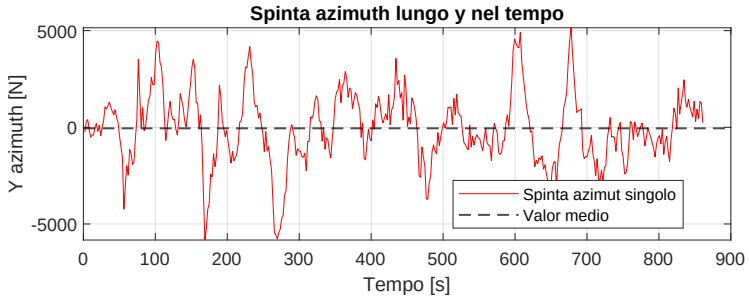
Tabella 3.13: *Valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione nel caso 180°*

Risultati direzione fissata caso 180°

Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di direzione fissata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 180°. In particolare, in figura 3.42 viene riportata la spinta di un singolo propulsore azimutale lungo le due coordinate x e y, in figura 3.43 la spinta di un singolo *bow thruster*, in figura 3.44 l'angolo di rotazione dei propulsori azimutali e in figura 3.45 l'andamento della somma delle spinte dei propulsori lungo le due coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut lungo x*



(b) *Spinta azimut lungo y*

Figura 3.42: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

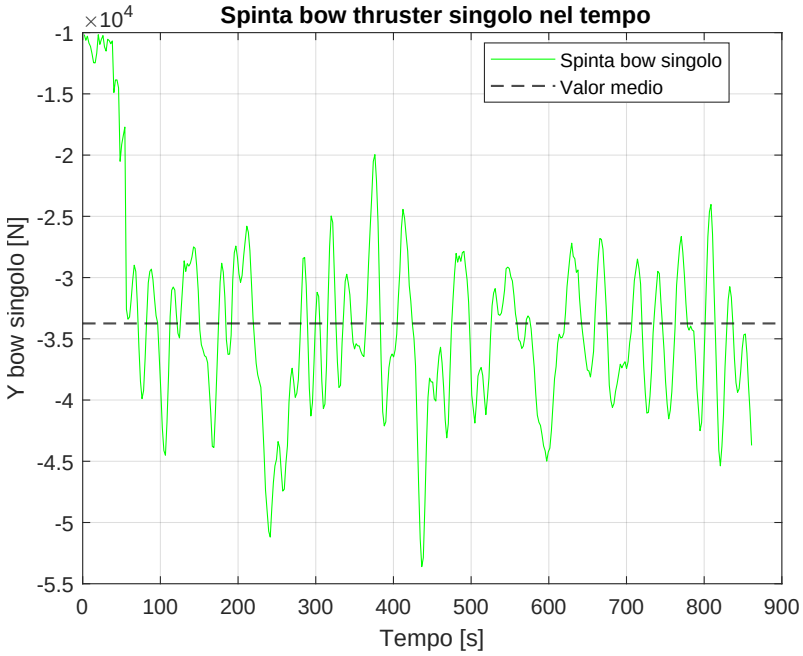


Figura 3.43: *Spinta bow thruster singolo*

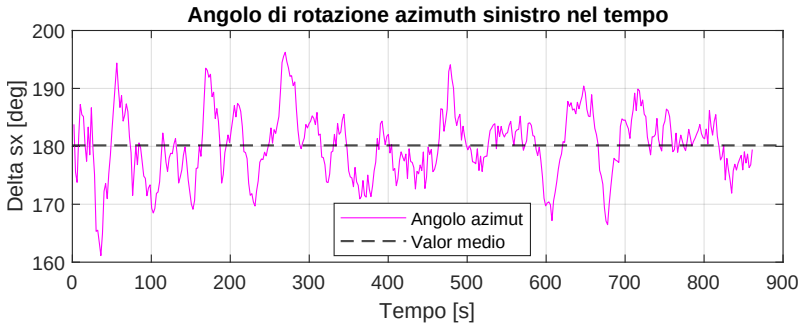
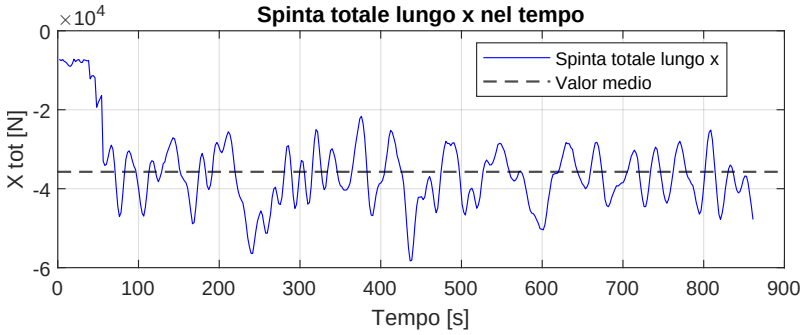
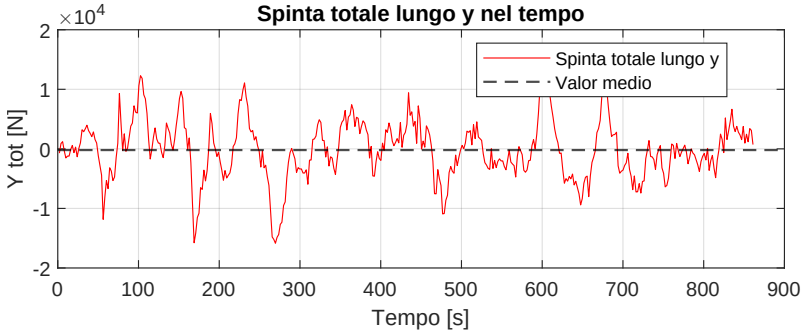


Figura 3.44: *Angolo di rotazione azimut*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.45: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

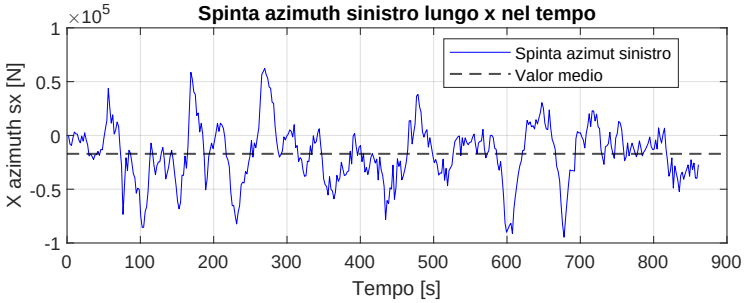
In tabella 3.14 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 180°.

Spinta azimut singolo lungo x (kN)	-17.9
Spinta azimut singolo lungo y (kN)	-0.05
Spinta bow thruster singolo (kN)	-0.05
Angolo di rotazione azimut (deg)	180.16
Spinta totale lungo x (kN)	-35.7
Spinta totale lungo y (kN)	-0.2

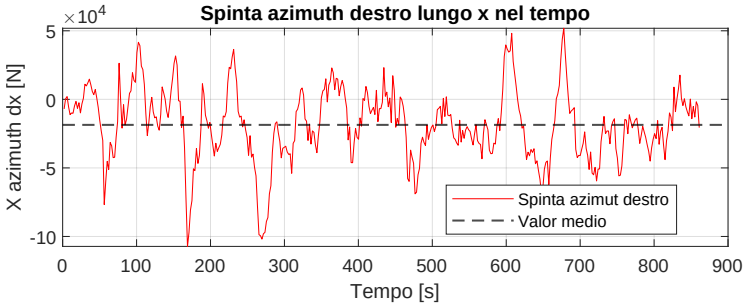
Tabella 3.14: *Valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso 180°*

Risultati assi fissi caso 180°

Per questo caso, essendo i distrubi ambientali provenienti da poppa verso prora, la scelta dell'allocazione ricade nel caso in cui entrambi i propulsori azimutali risultino essere fissati a 0° per compensare le forze longitudinali, mentre le piccole componenti trasversali vengono compensate direttamente dai *bow thruster*. Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di assi fissi nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 180°. In particolare, in figura 3.46 viene riportata la spinta dei due singoli propulsori azimutali lungo le coordinate x e y, in figura 3.47 la spinta di un singolo *bow thruster* e in figura 3.48 l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*



(b) *Spinta azimut destro lungo x*

Figura 3.46: *Spinte lungo x dei due propulsori azimutali*

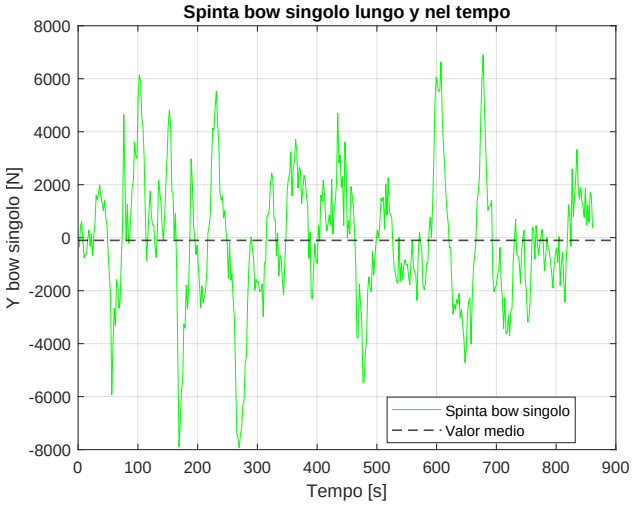
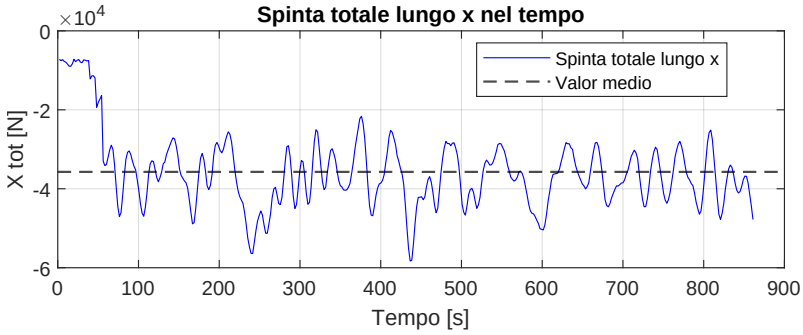
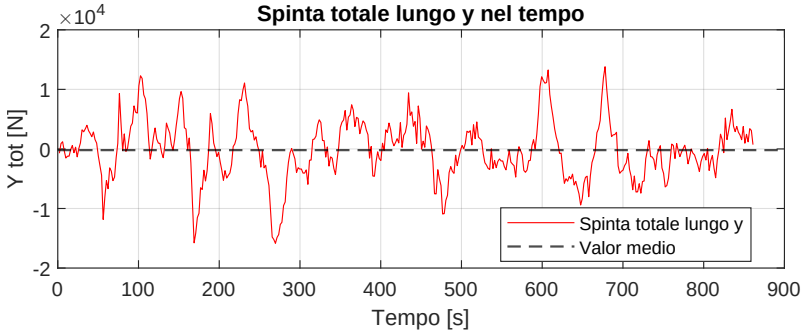


Figura 3.47: *Spinta bow thruster singolo*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.48: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

In tabella 3.15 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 180°.

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	−17.1
Spinta azimut destro lungo x (kN)	−18.6
Spinta bow thruster singolo (kN)	−0.1
Spinta totale lungo x (kN)	−35.7
Spinta totale lungo y (kN)	−0.2

Tabella 3.15: *Valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso 180°*

Risultati con direzione forze 45°

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti nel caso di direzione di provenienza delle forze con media di 45°: in figura 3.49, 3.50, 3.51 vengono riportate le storie temporali di direzione del vento, della corrente e delle onde, mentre in figura 3.52 e 3.53 le forze ambientali totali lungo le coordinate x e y.

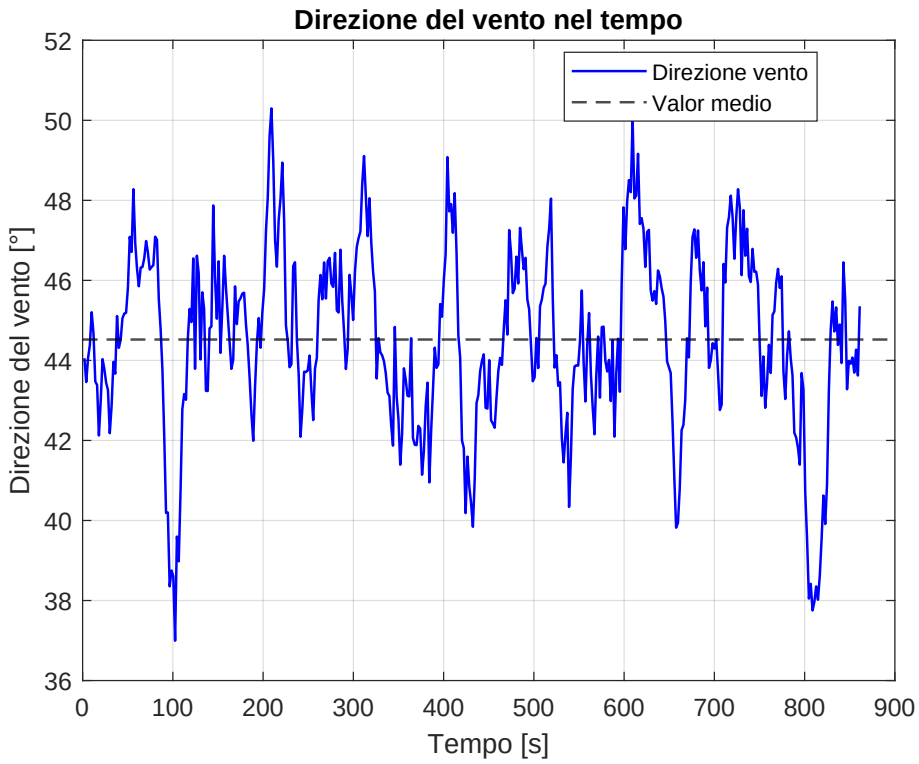


Figura 3.49: *Direzione del vento nel tempo nell'intorno di 45°*

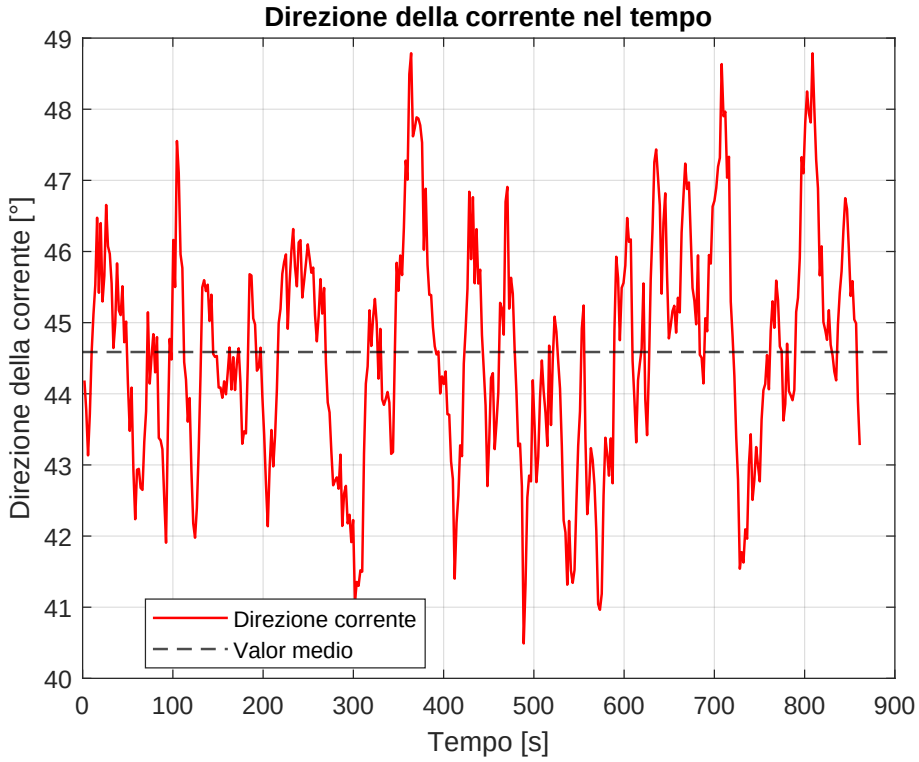


Figura 3.50: *Direzione del vento nel tempo nell'intorno di 45°*

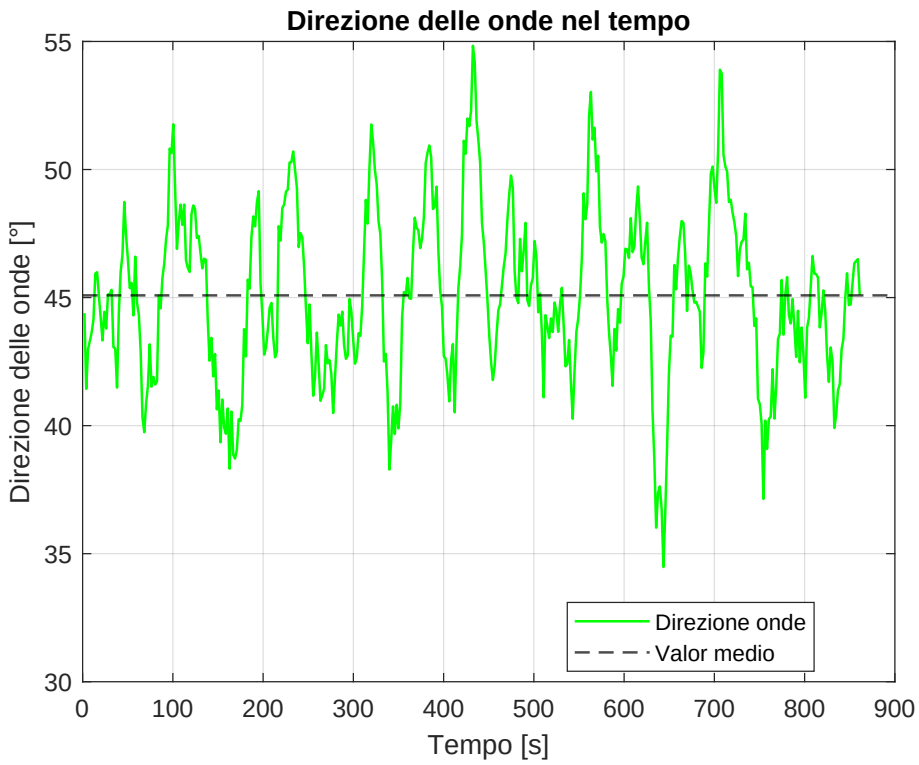


Figura 3.51: *Direzione del vento nel tempo nell'intorno di 45°*

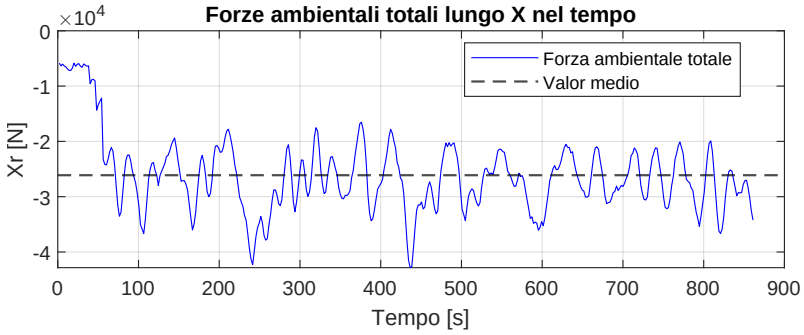


Figura 3.52: *Forze ambientali totali lungo x caso 45°*

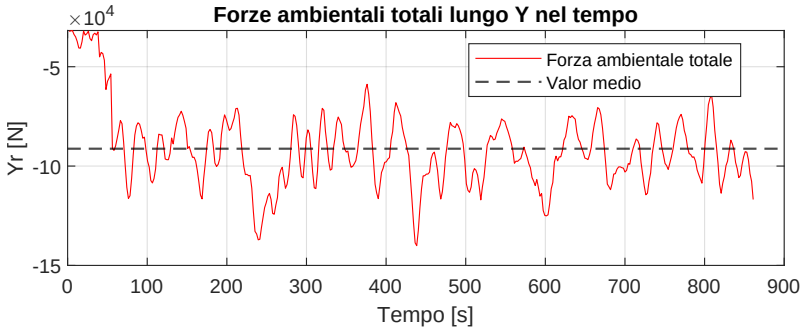


Figura 3.53: *Forze ambientali totali lungo y caso 45°*

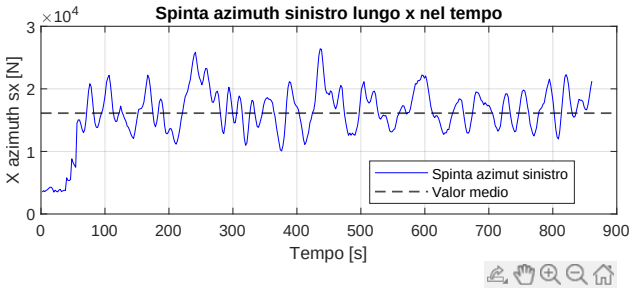
In tabella 3.16 vengono riportati i valori medi dei segnali temporali nel caso 45°.

Direzione vento (deg)	44.52
Direzione corrente (deg)	44.59
Direzione onde (deg)	45.09
Forze ambientali totali lungo x (kN)	−26.1
Forze ambientali totali lungo y (kN)	−91.3

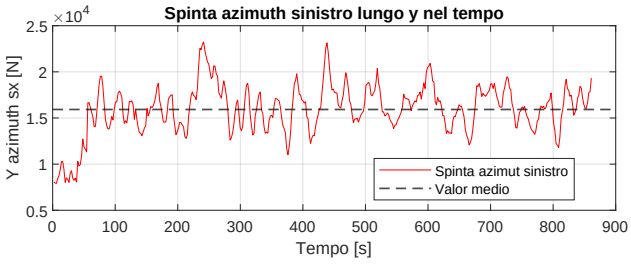
Tabella 3.16: *Valori medi dei segnali temporali nel caso 45°*

Risultati ottimizzazione caso 45°

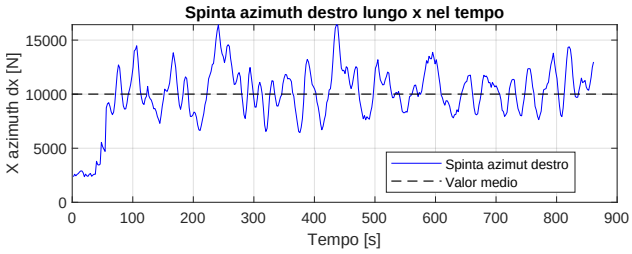
Vengono riportati di seguito i risultati ottenuti con la strategia di ottimizzazione vincolata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 45°. In particolare in figura 3.54 viene riportata la spinta dei due propulsori azimutali lungo le due coordinate x e y, in figura 3.55 la spinta di un solo *bow thruster*, in figura 3.56 l'angolo di rotazione di ognuno dei due propulsori azimutali e in figura 3.57 l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



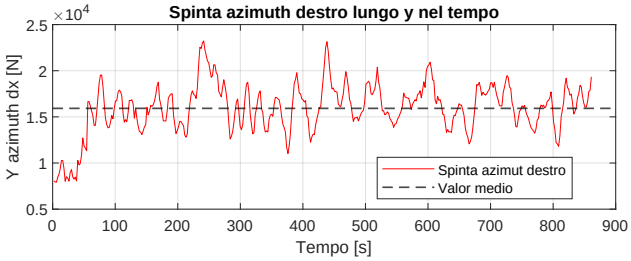
(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*



(b) *Spinta azimut sinistro lungo y*



(c) *Spinta azimut destro lungo x*



(d) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 3.54: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

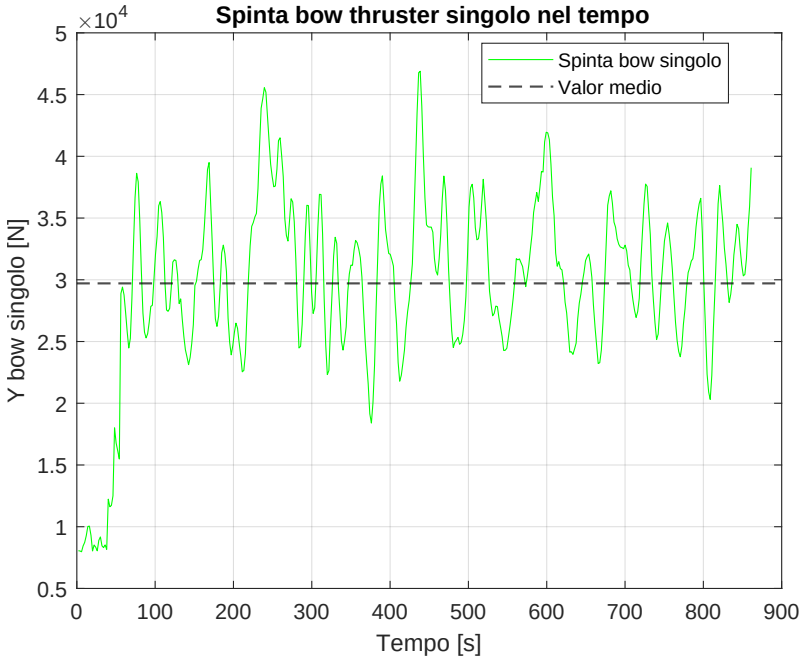
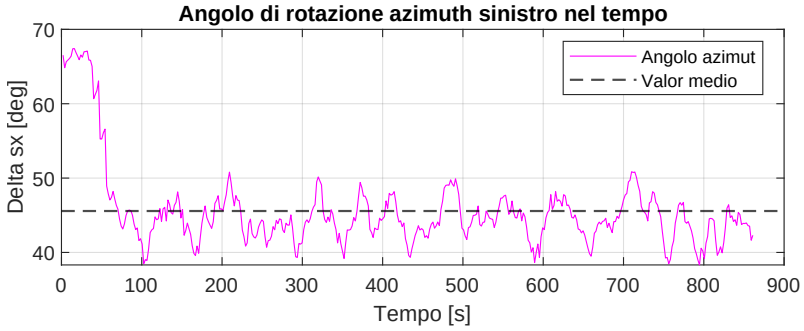
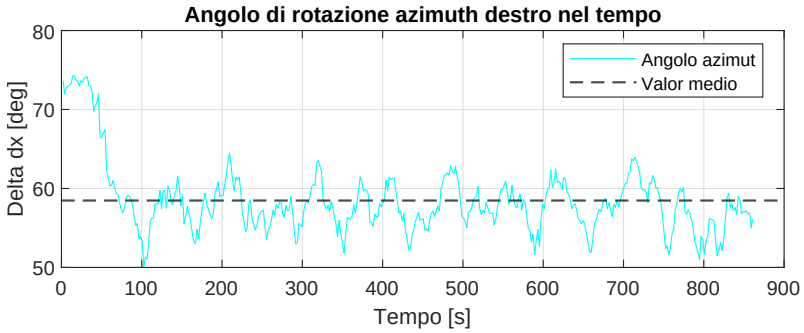


Figura 3.55: *Spinta bow thruster singolo*

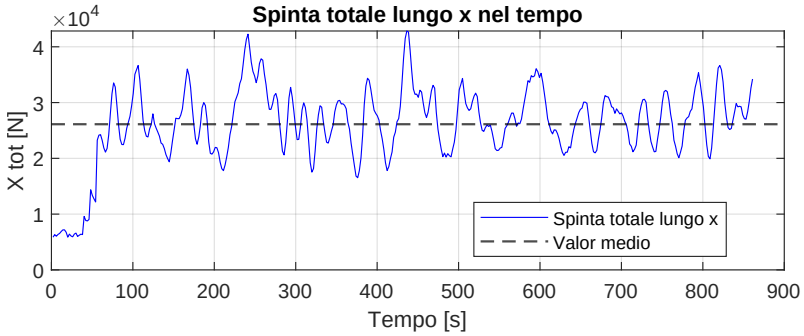


(a) *Angolo di rotazione azimut sinistro*

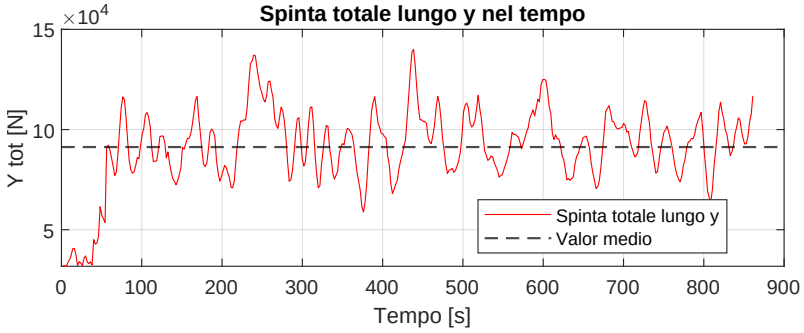


(b) *Angolo di rotazione azimut destro*

Figura 3.56: *Andamento angoli di rotazione degli azimut nel tempo*



(a) *Spinta totale lungo x nel tempo*



(b) *Spinta totale lungo y nel tempo*

Figura 3.57: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

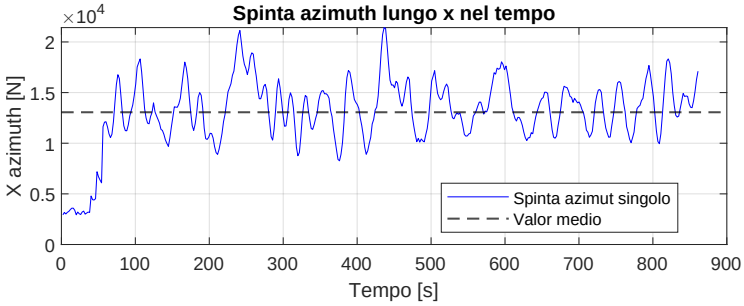
In tabella 3.17 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione vincolata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 45°.

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	16.1
Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	15.9
Spinta azimut destro lungo x (kN)	10
Spinta azimut destro lungo y (kN)	15.9
Spinta bow thruster singolo (kN)	29.7
Angolo di rotazione azimut sinistro (deg)	45.57
Angolo di rotazione azimut destro (deg)	58.47
Spinta totale lungo x (kN)	26.1
Spinta totale lungo y (kN)	91.3

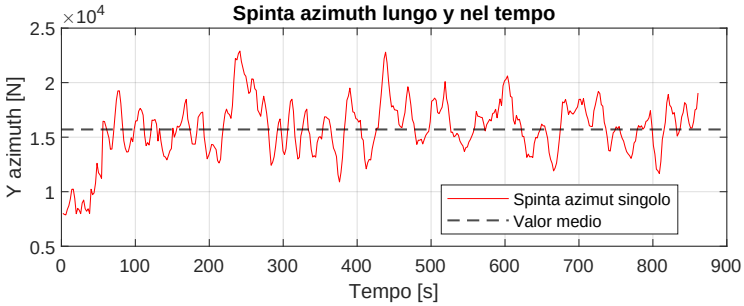
Tabella 3.17: *Valori medi dei risultati ottenuti con ottimizzazione nel caso 45°*

Risultati direzione fissata caso 45°

Vengono riportati di seguito i risultati ottenuti con la strategia di direzione fissata nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 45°. In particolare, in figura 3.58 viene riportata la spinta di un singolo propulsore azimutale lungo le due coordinate x e y, in figura 3.59 la spinta di un singolo *bow thruster*, in figura 3.60 l'angolo di rotazione dei propulsori azimutali e in figura 3.61 l'andamento della somma delle spinte dei propulsori lungo le due coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut lungo x*



(b) *Spinta azimut lungo y*

Figura 3.58: *Spinte lungo le coordinate x e y degli azimut*

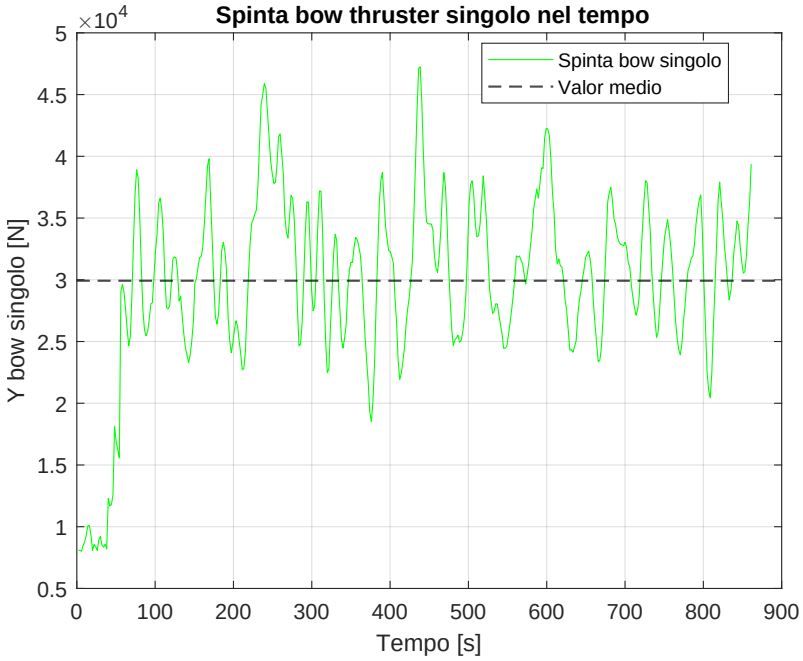


Figura 3.59: *Spinta bow thruster singolo*

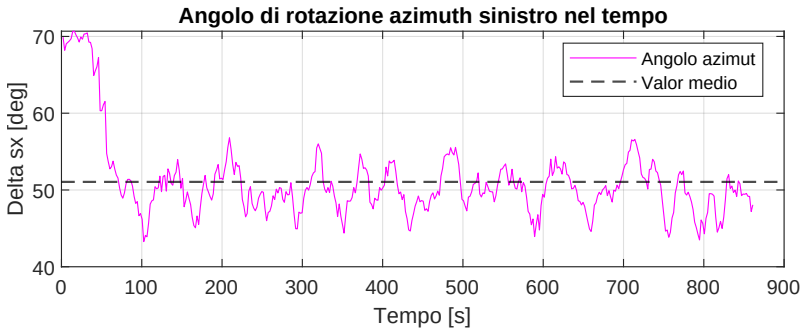
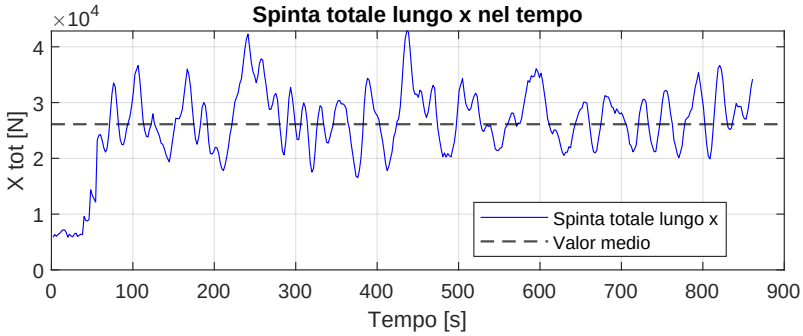
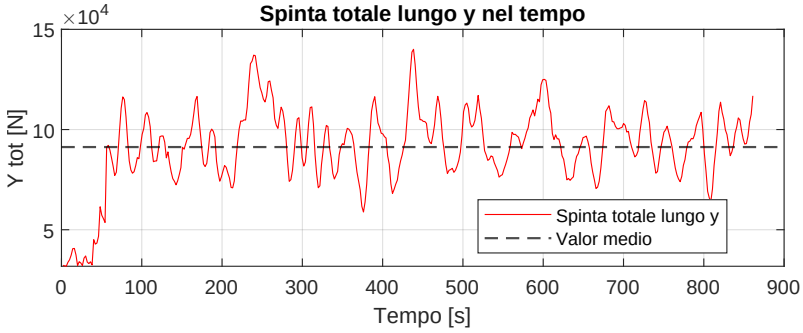


Figura 3.60: *Angolo di rotazione azimut*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.61: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

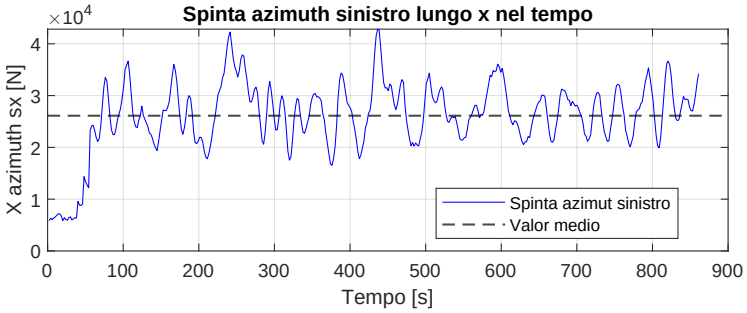
In tabella 3.18 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 45°.

Spinta azimut singolo lungo x (kN)	13.1
Spinta azimut singolo lungo y (kN)	15.7
Spinta bow thruster singolo (kN)	29.9
Angolo di rotazione azimut (deg)	51.05
Spinta totale lungo x (kN)	26.1
Spinta totale lungo y (kN)	91.3

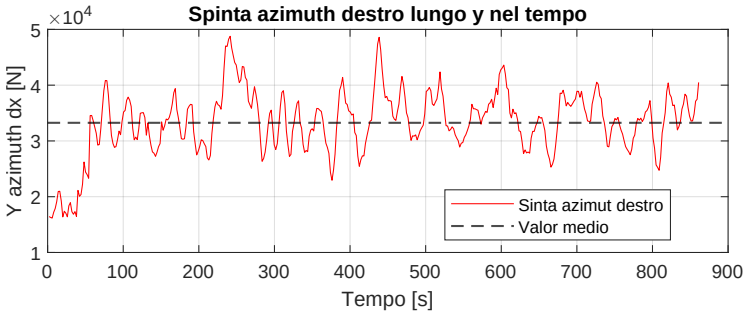
Tabella 3.18: *Valori medi dei risultati ottenuti con direzione fissata nel caso 45°*

Risultati assi fissi caso 45°

In questo ultimo caso, essendo i disturbi ambientali provenienti dal mascone sinistro, la scelta dell'allocazione ricade nel caso in cui l'azimut destro è ruotato di 90° mentre quello sinistro rimane fisso a 0° per compensare le componenti longitudinali. Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di assi fissi nel caso in cui la direzione delle forze ambientali ha media di 45°. In particolare, in figura 3.62 viene riportata la spinta dei due singoli propulsori azimutali lungo le coordinate x e y, in figura 3.63 la spinta di un singolo *bow thruster* e in figura 3.64 l'andamento della somma delle spinte dei vari propulsori lungo le coordinate x e y.



(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*



(b) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 3.62: *Spinte lungo le coordinate x e y dei due propulsori azimutali*

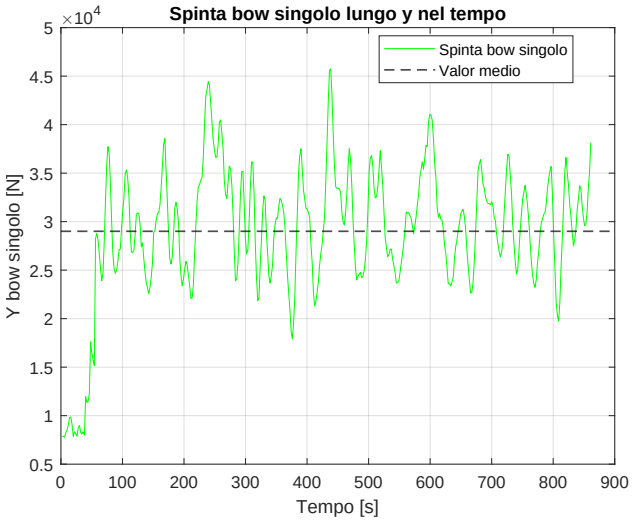
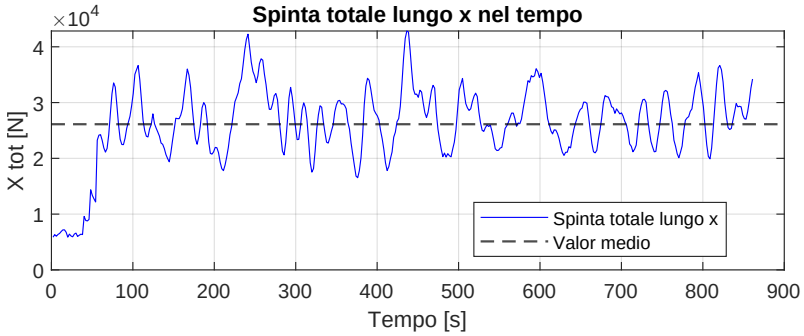
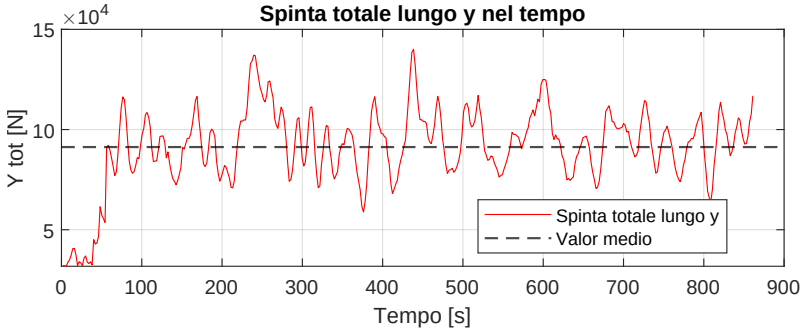


Figura 3.63: *Spinta bow thruster singolo*



(a) *Spinta totale lungo x*



(b) *Spinta totale lungo y*

Figura 3.64: *Andamento delle spinte totali dei propulsori lungo le coordinate x e y*

In tabella 3.19 vengono riportati i valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso di direzione di provenienza delle forze ambientali con media di 45°.

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	26.1
Spinta azimut destro lungo y (kN)	33.2
Spinta bow thruster singolo (kN)	29
Spinta totale lungo x (kN)	26.1
Spinta totale lungo y (kN)	91.3

Tabella 3.19: *Valori medi dei risultati ottenuti con assi fissi nel caso 45°*

Analisi comparativa dei risultati

Come si può notare dai risultati enunciati precedentemente, sono stati effettuati diversi casi di direzione di provenienza delle forze ambientali per validare il lavoro eseguito e confermare la sua correttezza. In prima approssimazione, dall'analisi dei risultati ottenuti nei diversi scenari simulati emerge che, indipendentemente dalla direzione di provenienza dei disturbi esterni (vento, onde e corrente), tutte le strategie di allocazione della spinta analizzate riescono a garantire la compensazione dei disturbi, assicurando il mantenimento della posizione della nave. Questo testimonia la robustezza dell'assetto propulsivo considerato e l'efficacia delle logiche di risoluzione del problema di allocazione della spinta implementate.

Tuttavia, per effettuare un confronto più approfondito tra le tre strategie di allocazione, in modo da poter evidenziare quali sono le differenze significative in termini di efficienza, sforzo richiesto ai propulsori e flessibilità operativa, si riportano di seguito alcune tabelle con i valori medi delle coordinate x e y delle spinte dei vari propulsori presenti a bordo, calcolati attraverso una media aritmetica. Questi risultati sono stati estrapolati dai grafici e dalle tabelle dei valori ottenuti con diverse direzioni di provenienza delle forze ambientali riportati nei paragrafi precedenti del capitolo 3.4.3.
In tabella 3.20 vengono riportate le spinte ottenute dei diversi propulsori lungo le due coordinate x e y nei tre casi di allocazione implementati, ipotizzando che la direzione di provenienza delle forze ambientali abbia media di 270°.

	Ottimizzazione	**Direzione fissata**	**Assi fissi**
Spinta azimut sinistro X [kN]	-2.03	0.5	–
Spinta azimut sinistro Y [kN]	-31.2	-31.1	-62.1
Spinta azimut destro X [kN]	3.02	0.5	0.99
Spinta azimut destro Y [kN]	-31.2	-31.1	–
Spinta bow thruster singolo [kN]	-33.6	-33.7	-33.7

Tabella 3.20: *Direzione forze 270°*

In tabella 3.21 vengono riportate le spinte ottenute dei diversi propulsori lungo le due coordinate x e y nei tre casi di allocazione implementati, ipotizzando che la direzione di provenienza delle forze ambientali abbia media di 180°.

	Ottimizzazione	**Direzione fissata**	**Assi fissi**
Spinta azimut sinistro X [kN]	-17.9	-17.9	-17.1
Spinta azimut sinistro Y [kN]	-0.05	-0.05	–
Spinta azimut destro X [kN]	-17.9	-17.9	-18.6
Spinta azimut destro Y [kN]	-0.05	-0.05	–
Spinta bow thruster singolo [kN]	-0.05	-0.05	-0.1

Tabella 3.21: *Direzione forze 180°*

In tabella 3.22 vengono riportate le spinte ottenute dei diversi propulsori lungo le due coordinate x e y nei tre casi di allocazione implementati, ipotizzando che la direzione di provenienza delle forze ambientali abbia media di 45°.

	Ottimizzazione	**Direzione fissata**	**Assi fissi**
Spinta azimut sinistro X [kN]	16.1	13.1	26.1
Spinta azimut sinistro Y [kN]	15.9	15.7	–
Spinta azimut destro X [kN]	10	13.1	–
Spinta azimut destro Y [kN]	15.9	15.7	33.2
Spinta bow thruster singolo [kN]	29.7	29.9	29

Tabella 3.22: *Direzione forze 45°*

Dopo aver inserito queste tabelle è possibile fare un confronto tra le tre diverse strategie di risoluzione del problema di allocazione della spinta implementate. A parità di forze ambientali e in termini di spinte richieste ai vari propulsori, è possibile concludere che:

- La strategia che sfrutta l'ottimizzazione vincolata rappresenta una strategia molto flessibile e performante, in quanto consente la completa libertà nella scelta della direzione e del modulo delle spinte, con opportuni vincoli. Per questo motivo, dal punto di vista delle spinte richieste ai propulsori presenti a bordo della nave, questa strategia risulta essere molto efficiente perchè permette di ottenere degli ottimi valori medi dei risultati prima descritti, soprattutto per quel che riguarda i due propulsori azimutali, evitando di avvicinarsi troppo ai valori massimi di spinta erogabili dai propulsori.

- La strategia che sfrutta la risoluzione del problema mediante direzione fissata, mantiene un comportamento molto simile, in termini di spinte richieste ai propulsori, rispetto alla strategia di ottimizzazione vincolata descritta precedentemente, nonostante sia caratterizzata da una semplificazione matematica; infatti, in questo caso, supponendo che entrambi i propulsori azimutali spingano con lo stesso angolo di rotazione, è possibile ridurre il numero di incognite considerando un solo propulsore azimutale equivalente, semplificando il problema da risolvere. Questa somiglianza tra le due configurazioni risolutive è comunque prevedibile, in quanto l'ottimizzatore ha come scopo quello di minimizzare la spinta erogata dai diversi propulsori, fornendo un risultato in cui le due eliche azimutali, pur non essendo vincolate a farlo, tendono comunque a spingere con angoli di rotazione simili. Questo metodo, fornendo risultati in termini di spinte richieste comparabili con quelle del caso ottimizzato, permette di avere dei vanatggi dal punto di vista computazionale.

- La strategia che sfrutta la risoluzione mediante assi fissi è quella che rappresenta, in termini di spinte richieste ai propulsori, le maggiori criticità; imporre direzioni rigide ai due propulsori azimutali limita le capacità del sistema ad adattarsi alle condizioni esterne, costringendo spesso i propulsori ad erogare spinte significativamente più elevate, rischiando di raggiungere le spinte massime erogabili. Queste spinte più elevate si ottengono, in

particolare, nel momento in cui la direzione delle forze ambientali si discosta dall'asse longitudinale della nave. Tra i casi analizzati, quindi, questo problema si ha quando la direzione di provenienza dei disturbi ha media di 270° e 45°, cioè quando la scelta dell'allocazione ricade nel caso in cui uno dei due propulsori azimutali è ruotato di 90° mentre l'altro è fisso in direzione longitudinale per compensare i disturbi lungo quella stessa direzione. Come si nota dalle tabelle 3.20 e 3.22, nel caso di assi fissi la spinta richiesta ai propulsori azimutali risulta essere addirittura raddoppiata rispetto ai due casi precedenti di ottimizzazione vincolata e direzione fissata. Nel caso in cui invece la direzione di provenienza delle forze non si discosti dall'asse longitudinale, come nel caso analizzato di 180°, e quindi la scelta di risoluzione ricade nel caso in cui entrambi i propulsori azimutali spingono in direzione longitudinale, le spinte richieste ai propulsori azimutali risultano essere molto simili ai due casi precedenti, come è possibile notare in tabella 3.21.

In conclusione, lo studio evidenzia come, pur garantendo tutte le strategie di risoluzione il mantenimento della posizione, l'ottimizzazione vincolata e la direzione fissata risultino essere preferibili in termini di spinte richieste ai propulsori.
D'altro canto queste due strategie non consentono di tenere in considerazione alcuni casi specifici: l'approccio con assi fissi implementato, infatti, garantisce che i due propulsori azimutali non spingano mai uno contro l'altro evitando di ricadere in alcune zone di forte interazione, come ad esempio in quelle di interazione elica-elica (*flushing*), che potrebbero causare grosse perdite di efficienza dei propulsori.
In un contesto operativo reale è quindi preferibile evitare di causare grosse perdite di efficienza dei propulsori, a patto di aumentare le spinte richieste a questi ultimi: in questi casi la scelta ricade sulla risoluzione del problema di allocazione della spinta utilizzando la strategia ad assi fissi.
Nel capitolo successivo si analizzano questi casi di interazione tra i diversi propulsori, in particolare il caso in cui uno dei due risulta essere in scia rispetto all'altro provocando una grossa perdita di efficienza: questo studio, come definito precedentemente, è stato effettuato solo per le strategie di ottimizzazione vincolata e direzione fissata, essendo che la strategia ad assi fissi garantisce di non entrare in queste zone di interazione (definite *forbidden zones*) già di per sè.

Capitolo 4

Interazione elica-elica

In questo capitolo si analizzano i casi di interazione elica-elica che si ottengono in alcuni specifici casi di direzione di provenienza dei disturbi esterni, risolvendo il problema di allocazione della spinta con le strategie di ottimizzazione vincolata e direzione fissata. Il fenomeno noto come *flushing* si verifica in condizioni critiche in cui i getti dei propulsori interferiscono tra loro, tipicamente quando uno dei due si trova nella scia dell'altro. Questa configurazione genera una perdita significativa di efficienza e può compromettere la stabilità del sistema di propulsione.
In questo capitolo si valutano alcune soluzioni che possano risolvere questo tipo di problema:

- è possibile saturare la spinta del propulsore che si trova in scia rispetto all'altro secondo una formula specifica fornita;
- è possibile disassare le spinte dei propulsori di un certo angolo in modo che venga annullata l'interazione tra questi;

Per il caso di direzione fissata è ragionevole utilizzare la prima soluzione, per mantenere l'ipotesi che gli angoli di rotazione dei due propulsori azimutali siano uguali. Per quel che riguarda, invece, il caso di ottimizzazione vincolata è più opportuno utilizzare la seconda soluzione, in quanto questa strategia di risoluzione dell'allocazione della spinta offre la massima libertà di orientamento dei propulsori.
Dal regolamento DNV, un propulsore investe con il proprio getto un altro propulsore funzionante se l'angolo tra la direzione della spinta (cioè il vettore lungo l'asse dell'elica che punta nella stessa direzione della forza di spinta) e il versore che va dal propulsore invetsito (*flushed*) a quello che investe (*flushing*) è inferiore ad un certo angolo

$$\theta = arctan(0.1 + \frac{1.0D}{s}) = 23.9deg$$

dove D è il diametro del propulsore pari a 2.8 m e s è la distanza orizzontale tra i due propulsori.
Se vale questa condizione, allora un propulsore risulta essere in scia all'altro e si deve utilizzare una delle due soluzioni descritte precedentemente per evitare un crollo delle prestazioni del propulsore in scia.

4.1 Saturazione della spinta

Le interazioni tra diversi propulsori sono state studiate attraverso prove su modelli negli ultimi decenni in numerose vasche navali. Anche se nei diversi test sono stati utilizzati propulsori diversi, i risultati sono comunque molto coerenti tra loro. I dati risultano essere disponibili sia per propulsori in acqua libera, sia per propulsori installati vicino ad una superficie solida, sia per la configurazione in tandem, sia per altre condizioni con angoli di governo differenti.
I risultati dei test di Lehn (1980) e Moberg (1983) per due propulsori in configurazione tandem sono riportati nella figura 4.1. Si osserva che i risultati sono molto allineati tra loro e quindi per applicazioni pratiche si può utilizzare la seguente formula, che fornisce una stima della perdita di spinta per il propulsore in scia rispetto all'altro con una certa accuratezza:

$$t = \frac{T}{T_0} = 1 - 0.80(\frac{x}{D})^3$$

dove T_0 è la spinta al punto fisso (*bolard pull*) in acqua libera, x è la distanza tra i due propulsori, D è il diametro del propulsore, T è la spinta del propulsore in scia e t è è il coefficiente di riduzione della spinta.

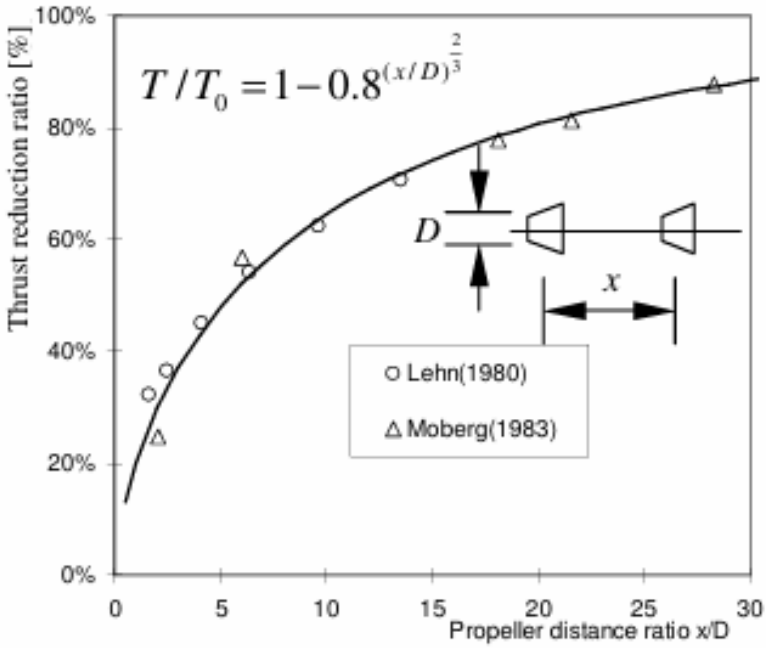


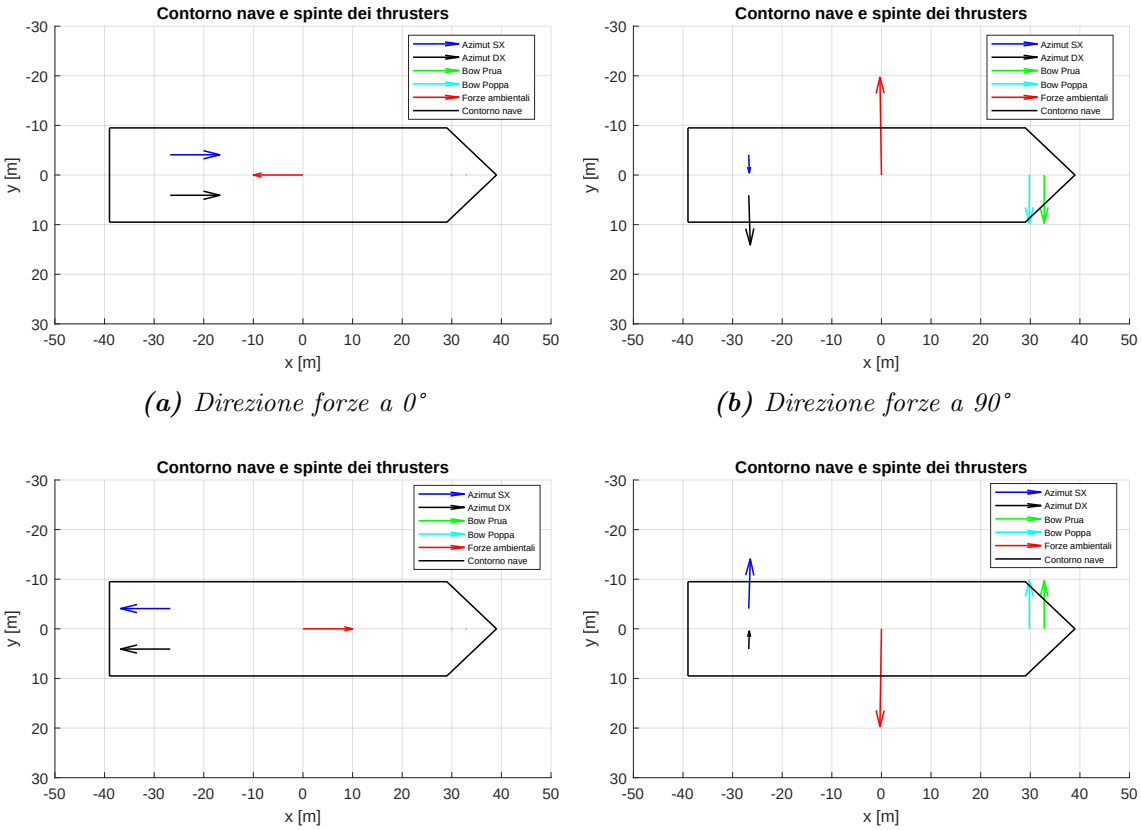
Figura 4.1: *Riduzione di spinta del propulsore in scia*

Nonostante questa formula sia stata ottenuta in condizioni di *bolard pull*, essa è valida anche per situazioni di navigazione libera e di posizionamento dinamico in presenza di forte corrente. Dai test su modelli a diverse velocità di navigazione è

emerso che la riduzione di spinta per il propulsore in scia è praticamente indipendente dalla velocità di navigazione, soprattutto a basse velocità.
Questa soluzione è stata applicata alla strategia di direzione fissata e in particolare sia nel caso statico, dove si inserisce manualmente la direzione di provenienza delle forze esterne, sia nel caso realistico, dove sono state generate delle storie temporali di forze ambientali.
Si riportano nei paragrafi successivi i risultati ottenuti.

4.1.1 Risultati caso statico con direzione fissata e saturazione della spinta

Si riportano in figura 4.2 e in tabella 4.1 i risultati ottenuti con la strategia di direzione fissata nel caso statico con saturazione della spinta, ossia quando si ipotizza che tutti i disturbi ambientali provengano da un'unica direzione fissata. I dati utilizzati per il caclolo delle forze ambientali sono gli stessi riportati nella tabella 3.3 del capitolo 3.4.1. In particolare si riportano i risultati delle spinte richieste ai diversi propulsori per quattro diverse direzioni di provenienza delle forze ambientali (0°, 90°, 180°, 270°) per effettuare una visione completa dello studio in esame.



(a) Direzione forze a 0°

(b) Direzione forze a 90°

(c) Direzione forze a 180°

(d) Direzione forze a 270°

Figura 4.2: *Risultati caso statico con direzione fissata e saturazione della spinta*

X_{azimutsx} (kN)	15.4
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	15.4
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(a) *Forze ambientali a 0° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	0.37
Y_{azimutsx} (kN)	11.9
X_{azimutdx} (kN)	1.01
Y_{azimutdx} (kN)	32.5
T_{bow} (kN)	63.1

(b) *Forze ambientali a 90° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	-15.2
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	-15.2
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(c) *Forze ambientali a 180° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	1.01
Y_{azimutsx} (kN)	-32.5
X_{azimutdx} (kN)	0.37
Y_{azimutdx} (kN)	-11.9
T_{bow} (kN)	-63.1

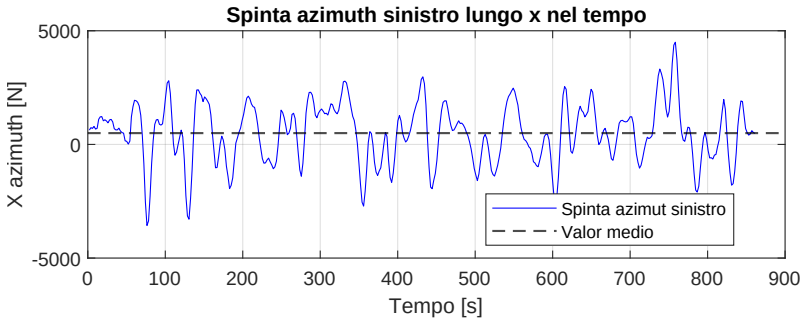
(d) *Forze ambientali a 270° e spinte ottenute*

Tabella 4.1: *Risultati caso statico con direzione fissata e saturazione della spinta*

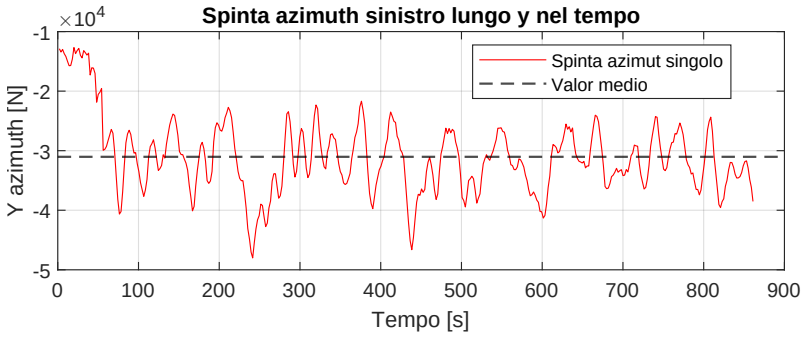
Come si vede dalla figura 4.2 e dalla tabella 4.1, la saturazione della spinta del propulsore in scia avviene solo nel caso in cui l'angolo tra la direzione della spinta e il versore che collega i due propulsori è inferiore all'angolo critico definito dalla formula del DNV: ciò avviene quindi nel caso in cui la direzione di provenienza delle forze è trasversale (90° e 270°) e la spinta del propulsore in scia risulta essere ridotta rispetto all'altra, come definito dalla formula approssimata. Nel caso in cui le forze ambientali provengano, invece, da una direzione longitudinale, il risultato che si ottiene è uguale a quello trovato senza tenere conto dell'interazione tra i propulsori.

4.1.2 Risultati caso realistico con direzione fissata e saturazione della spinta

Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di direzione fissata nel caso realistico con saturazione della spinta, ossia quando viene fornita una storia temporale di velocità e direzione di vento e corrente oltre che ad una storia temporale di altezza significativa, periodo e direzione delle onde. In particolare i dati utilizzati per il calcolo delle forze ambientali sono gli stessi dei grafici riportati nelle figure 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 nel caso in cui la direzione di vento, onde e corrente ha un valor medio di 270°, essendo questo caso analizzato l'unico in cui l'angolo tra la direzione della spinta e il versore che collega i due propulsori riuslta essere inferiore rispetto all'angolo critico. In particolare si riportano solo i risultati più utili per la verifica dello studio eseguito, ossia le spinte lungo le coordinate x e y dei due propulsori azimutali che mettono in mostra la reale caduta di spinta che si ha nel caso di interazione tra i propulsori. La figura 4.3 mostra l'andamento delle spinte richieste al propulsore azimutale sinistro mentre la figura 4.4 l'andamento delle spinte richieste al propulsore azimutale destro.

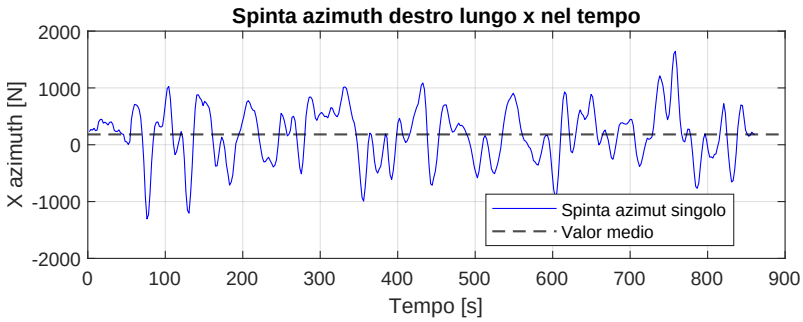


(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*

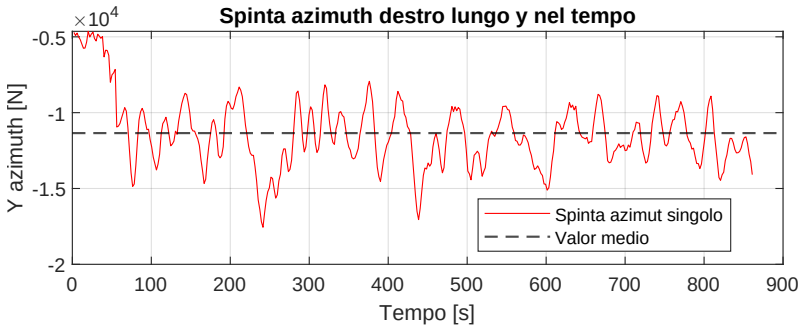


(b) *Spinta azimut sinistro lungo y*

Figura 4.3: *Andamento delle spinte dell'azimut sinistro lungo x e y*



(a) *Spinta azimut destro lungo x*



(b) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 4.4: *Andamento delle spinte dell'azimut destro lungo x e y*

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	0.5
Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	−31
Spinta azimut destro lungo x (kN)	0.18
Spinta azimut destro lungo y (kN)	−11.3

Tabella 4.2: *Valori medi dei risultati ottenuti con saturazione nel caso di 270°*

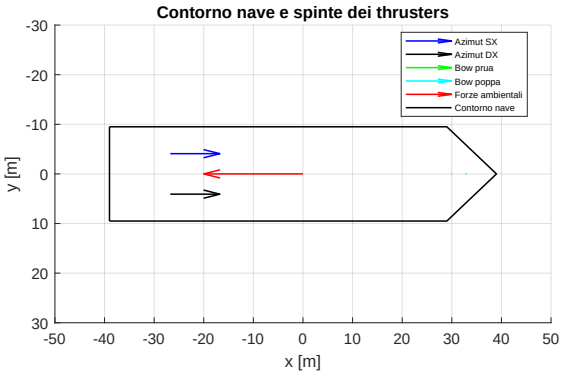
In questo specifico caso, in cui l'angolo delle forze ambientali ha media di 270°, il propulsore azimutale di dritta risulta essere in scia rispetto a quello di sinistra; dalle figure 4.3 e 4.4 e in particolare dalla tabella 4.2, si nota, infatti, come il modulo delle spinte richieste al propulsore azimutale destro sia minore rispetto a quello richiesto al propulsore azimutale sinistro, come da aspettative. Nel caso in cui, invece, si utilizzi una direzione dei disturbi esterni con media di 45° o 180°, l'angolo che si forma tra la direzione della spinta e il vettore che collega i due propulsori è maggiore rispetto all'angolo critico e quindi i risultati che si ottengono risultano essere identici a quelli riportati nei paragrafi precedenti in cui non si teneva conto dell'interazione tra i diversi propulsori.
In conclusione, l'applicazione della saturazione della spinta ha dimostrato di essere un metodo efficace per tenere conto dell'interazione tra i propulsori nel caso di direzione fissata. Il metodo permette di prevenire condizioni di *flushing*, mantenendo l'efficienza propulsiva in condizioni realistiche e contribuendo ad una migliore affidabilità del sistema di posizionamento dinamico.

4.2 Disassamento delle spinte

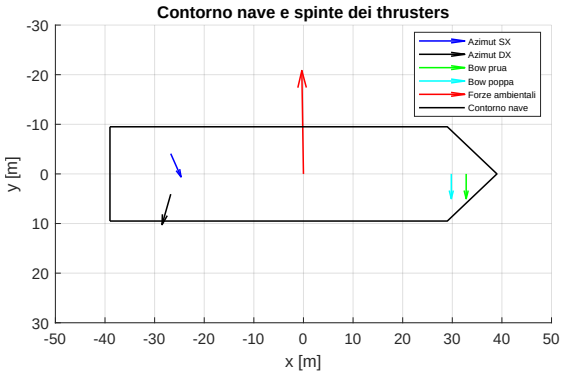
Dopo aver analizzato la soluzione al problema dell'interazione tra i propulsori mediante la saturazione della spinta del propulsore in scia, in questo paragrafo si prende in esame una seconda modalità risolutiva, basata sul disassamento angolare dei propulsori azimutali. In particolare questo tipo di soluzione è stato utilizzato nel caso di risoluzione del problema di allocazione della spinta con il metodo di ottimizzazione. Al problema di ottimizzazione vincolata descritto precedentemente nel capitolo 3.3.1, sono stati aggiunti due vincoli di disuguaglianza che permettono di evitare l'interazione elica-elica; questi due vincoli assicurano che il prodotto scalare tra la direzione della spinta normalizzata e il vettore normalizzato che collega i due propulsori azimutali sia minore del coseno dell'angolo critico (calcolato sempre con la formula descritta nel regolamento DNV). In particolare sono stati aggiunti due vincoli di disuguaglianza per tenere conto delle due possibilità di interazione, ossia il caso in cui il propulsore azimutale destro sia in scia oppure il caso contrario in cui quello sinistro risulti essere nella scia dell'altro. Anche in questo caso, questo tipo di soluzione è stato applicato sia nel caso statico, nel quale si inserisce manualmente la direzione di provenienza delle forze esterne che risulta essere fissa, sia nel caso realistico, dove sono state generate delle storie temporali di forze ambientali.
Si riportano nei paragrafi successivi i risultati ottenuti.

4.2.1 Risultati caso statico con ottimizzazione vincolata e disassamento della spinta

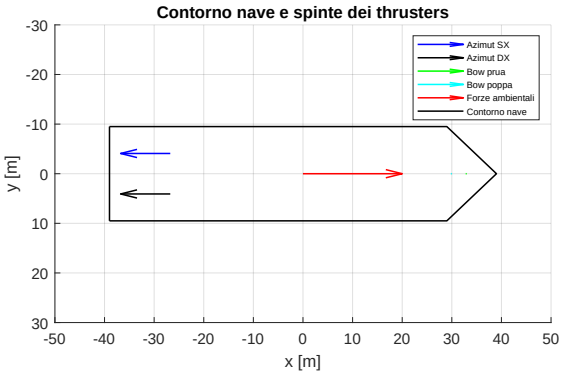
Si riportano in figura 4.5 e in tabella 4.3 i risultati ottenuti con la strategia di ottimizzazione vincolata nel caso statico con disassamento della spinta, ossia quando si ipotizza che tutti i disturbi ambientali provengano da un'unica direzione fissata. I dati utilizzati per il calcolo delle forze ambientali sono gli stessi riportati nella tabella 3.3 del capitolo 3.4.1. In particolare si riportano i risultati delle spinte richieste ai vari propulsori per quattro diverse direzioni di provenienza delle forze ambientali (0°, 90°, 180°, 270°) per effettuare una visione completa dello studio in esame.



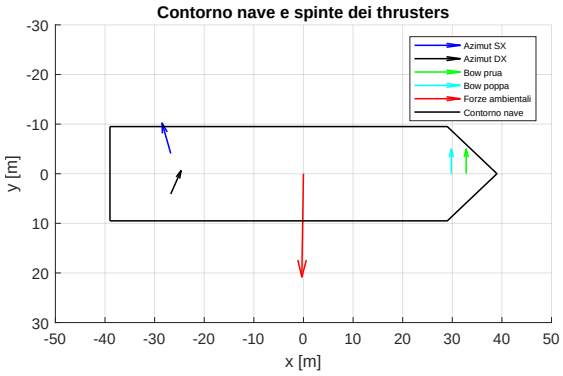
(a) Direzione forze a 0°



(b) Direzione forze a 90°



(c) Direzione forze a 180°



(d) Direzione forze a 270°

Figura 4.5: *Risultati caso statico con ottimizzazione e disassamento della spinta*

X_{azimutsx} (kN)	15.4
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	15.4
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(a) *Forze ambientali a 0° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	12.8
Y_{azimutsx} (kN)	28.8
X_{azimutdx} (kN)	−10.8
Y_{azimutdx} (kN)	37.8
T_{bow} (kN)	61.5

(b) *Forze ambientali a 90° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	−15.2
Y_{azimutsx} (kN)	0
X_{azimutdx} (kN)	−15.2
Y_{azimutdx} (kN)	0
T_{bow} (kN)	0

(c) *Forze ambientali a 180° e spinte ottenute*

X_{azimutsx} (kN)	−10.8
Y_{azimutsx} (kN)	−37.8
X_{azimutdx} (kN)	12.8
Y_{azimutdx} (kN)	−28.8
T_{bow} (kN)	−61.5

(d) *Forze ambientali a 270° e spinte ottenute*

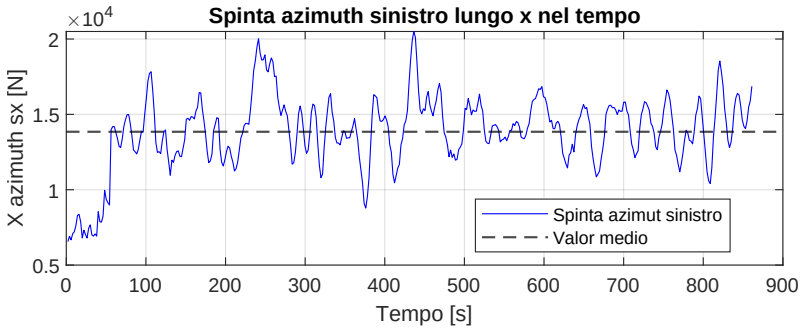
Tabella 4.3: *Risultati caso statico con ottimizzazione e disassamento della spinta*

Come si può evidenziare dai risultati riportati, il disassamento della spinta dei propulsori azimutali avviene solo nel caso in cui l'angolo tra la direzione della spinta e il versore che collega i due propulsori azimutali è inferiore all'angolo critico definito dalla formula del DNV: ciò avviene quindi nel caso in cui la direzione di provenienza delle forze ambientali esterne è trasversale (90° e 270°). In questi due casi, infatti, si può notare come le spinte vengano disassate di un certo angolo, in modo che nessuno dei due propulsori spinga verso l'altro. Nel caso in cui invece le forze ambientali provengano da una direzione longitudinale, il risultato che si ottiene è uguale a quello trovato senza tenere conto dell'interazione tra i propulsori.

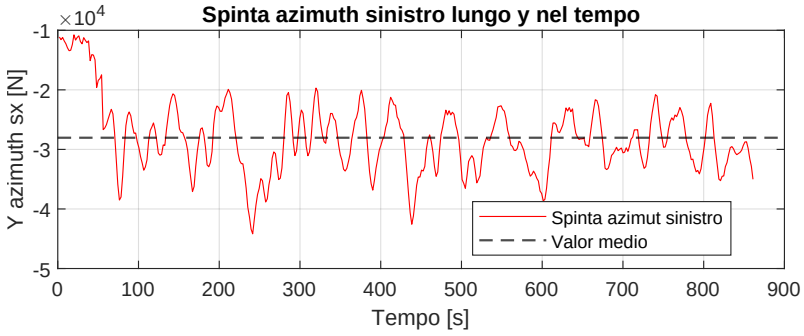
4.2.2 Risultati caso realistico con ottimizzazione vincolata e disassamento della spinta

Si riportano di seguito i risultati ottenuti con la strategia di ottimizzazione vincolata nel caso realistico con disassamento della spinta, ossia quando viene formita una storia temporale di velocità e direzione di vento e corrente oltre che ad una storia temporale di altezza significativa, periodo e direzione delle onde. In particolare i dati utilizzati per il calcolo delle forze ambientali sono gli stessi dei grafici riportati nelle figure 3.13, 3.14, 3.15, 3.16 nel caso in cui la direzione di vento, onde e corrente ha un valor medio di 270°, essendo questo caso analizzato l'unico in cui l'angolo tra la direzione della spinta e il versore che collega i due propulsori risulta essere inferiore rispetto all'angolo critico. Si riportano solo i risultati più utili per la verifica dello studio eseguito, ossia le spinte lungo le coordinate x e y e l'andamento degli angoli di rotazione dei due propulsori azimutali che mettono in mostra il reale disassamento delle spinte nel caso di interazione.
Inizialmente, per risolvere questo problema si è utilizzato lo stesso ottimizzatore del caso statico: questo ha provocato alcuni problemi nella storia temporale delle

spinte richieste in quanto si ottenevano molti salti di angolo di rotazione dei due propulsori che provocavano un'eccessiva usura meccanica di questi ultimi.
Per risolvere questo problema e ridurre i salti sono stati eliminati i due vincoli di disuguaglianza ed è stato inserito un disassamento manuale di 30° nel caso in cui uno dei due propulsori azimutali risultasse essere in scia rispetto all'altro.
In figura 4.6 si mostra l'andamento delle spinte richieste al propulsore azimutale sinistro, in figura 4.7 l'andamento delle spinte richieste al propulsore azimutake destro e in figura 4.8 l'andamento degli angoli di rotazione dei due propulsori azimutali.

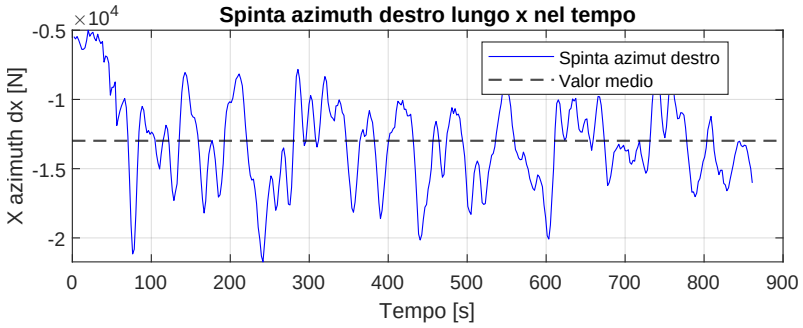


(a) *Spinta azimut sinistro lungo x*

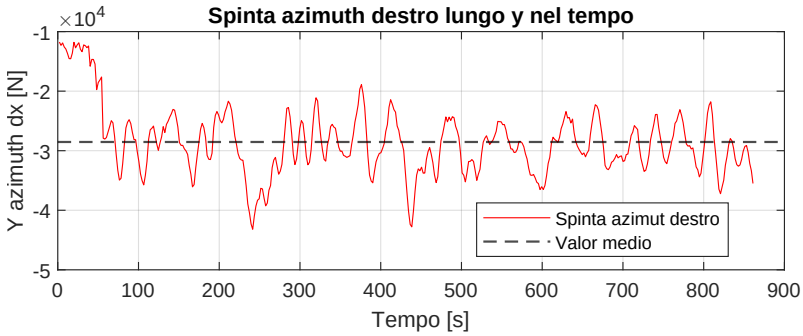


(b) *Spinta azimut sinistro lungo y*

Figura 4.6: *Andamento delle spinte dell'azimut sinistro lungo x e y*

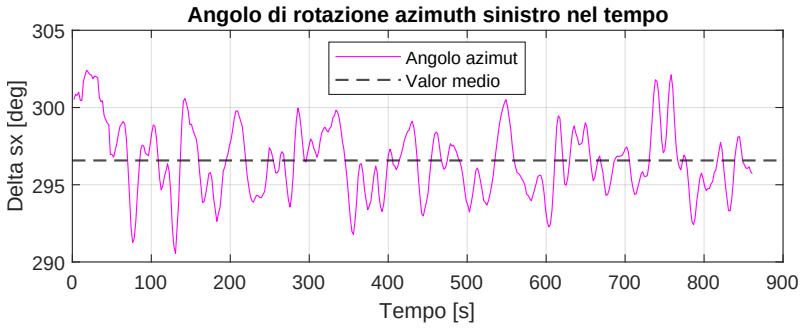


(a) *Spinta azimut destro lungo x*

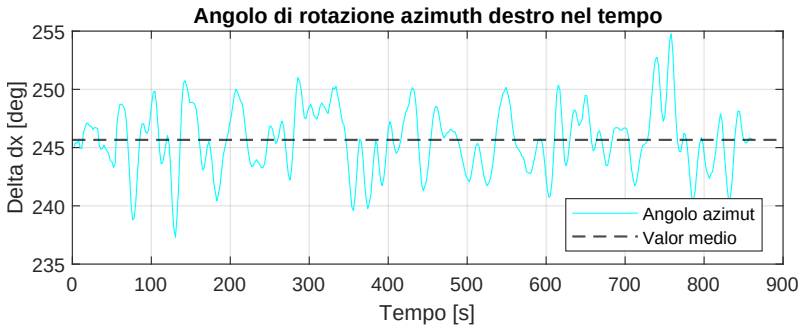


(b) *Spinta azimut destro lungo y*

Figura 4.7: *Andamento delle spinte dell'azimut destro lungo x e y*



(a) *Angolo di rotazione azimut sinistro*



(b) *Angolo di rotazione azimut destro*

Figura 4.8: *Andamento degli angoli di rotazione dei due propulsori azimutali*

Spinta azimut sinistro lungo x (kN)	13.8
Spinta azimut sinistro lungo y (kN)	−28
Spinta azimut destro lungo x (kN)	−13
Spinta azimut destro lungo y (kN)	−28.5
Angolo di rotazione azimut sinistro (°)	296.6
Angolo di rotazione azimut destro (°)	245.7

Tabella 4.4: *Valori medi dei risultati ottenuti con disassamento nel caso di 270°*

In questo specifico caso, in cui l'angolo delle forze ambientali ha media di 270°, il propulsore azimutale di dritta risulta essere in scia rispetto a quello di sinistra. In questa situazione, infatti, viene applicata la soluzione del disassamento delle spinte come si può notare dalla tabella 4.4 dove i valori medi degli angoli di rotazione dei due propulsori azimutali non risultano essere simili, ma disassati di un certo angolo in modo che nessuno dei due risulti essere in scia rispetto all'altro. Nel caso in cui, invece, si utilizzi una direzione dei disturbi esterni con media di 45° o 180°, l'angolo che si forma tra la direzione della spinta e il vettore che collega i due propulsori è maggiore rispetto all'angolo critico e quindi i risultati che si ottengono risultano essere identici a quelli riportati nei paragrafi precedenti in cui non si teneva conto dell'interazione tra i diversi propulsori.
In conclusione, l'applicazione del disassamento della spinta ha dimostrato di essere un metodo efficace per tenere conto dell'interazione tra i propulsori nel caso di ottimizzazione vincolata, in modo da poter scegliere in maniera arbitraria gli angoli di rotazione dei propulsori azimutali. Il metodo permette di prevenire condizioni di *flushing*, mantenendo l'efficienza propulsiva in condizioni realistiche e contribuendo ad una migliore affidabilità del sistema di posizionamento dinamico.

Capitolo 5

Simulazioni

Per valutare l'efficacia delle strategie di allocazione della spinta sviluppate e la risposta della nave ai disturbi ambientali, si è realizzato un modello di simulazione in *Simulink*.
A partire dalle forze ambientali calcolate e dalle spinte generate dal sistema propulsivo, si è ricavata la traiettoria della nave in termini di coordinate x (avanzo), y (deriva) e ψ (imbardata). Questo modello si è basato su alcune ipotesi fondamentali tra cui:

- trascurare gli effetti di *Coriolis*;
- l'inutilizzo delle velocità relative tra nave e disturbi ambientali;
- considerare il dislocamento della nave costante.

Queste assunzioni, pur riducendo il realismo del modello, hanno permesso di ottenere una soluzione semplice e adatta a mettere in evidenza l'effetto dei disturbi esterni e delle spinte dei propulsori sul moto della nave.
Partendo dalla seconda legge di Newton, si sono calcolate le accelerazioni nel sistema di riferimento solidale con la nave, utilizzando le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} \dot{u} = \frac{X_{WIND}+X_{WAVE}+X_{CURRENT}}{\Delta+X_{\dot{u}}} + \frac{X_{PROP}}{\Delta+X_{\dot{u}}} \\ \dot{v} = \frac{Y_{WIND}+Y_{WAVE}+Y_{CURRENT}}{\Delta+Y_{\dot{v}}} + \frac{Y_{PROP}}{\Delta+Y_{\dot{v}}} \\ \dot{r} = \frac{N_{WIND}+N_{WAVE}+N_{CURRENT}}{I_{ZZ}+N_{\dot{r}}} + \frac{N_{PROP}}{I_{ZZ}+N_{\dot{r}}} \end{cases}$$

dove Δ è il dislocamento della nave pari a 3000 t, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$ e $N_{\dot{r}}$ sono chiamati rispettivamente termini di massa aggiunta e di inerzia aggiunta.
Integrando queste accelerazioni è possibile ottenere le rispettive velocità u, v e r che sono state successivamente ruotate e traslate nel sistema di riferimento fisso per mezzo della matrice di rotazione. Si sono ottenute, quindi, le velocità nel sistema di riferimento fisso con le seguenti formule:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ v \\ r \end{bmatrix}$$

Integrando ulteriormente queste velocità è stato possibile ottenere la traiettoria della nave in termini di coordinate x, y e ψ.
Infine, per rendere visibile l'effetto del tempo di risposta del sistema, si è introdotto un ritardo temporale che ha consentito di osservare con maggiore realismo la dinamica sotto l'azione dei disturbi.
In particolare, si è sviluppato questo modello per i tre casi di direzione delle forze descritti nei capitoli precedenti (270°, 180°, 45°).
Si riportano di seguito i risultati ottenuti in forma grafica rappresentanti la traiettoria percorsa nel piano (x, y) dall'unità navale durante la simulazione e l'andamento dell'angolo di imbardata nel tempo.

Risultati caso 270°

In figura 5.1 e 5.2 vengono riportati rispettivamente la traiettoria percorsa dall'imbarcazione e l'andamento dell'angolo di imbardata ψ durante la simulazione, nel caso in cui la direzione dei disturbi risulti avere media di 270°.

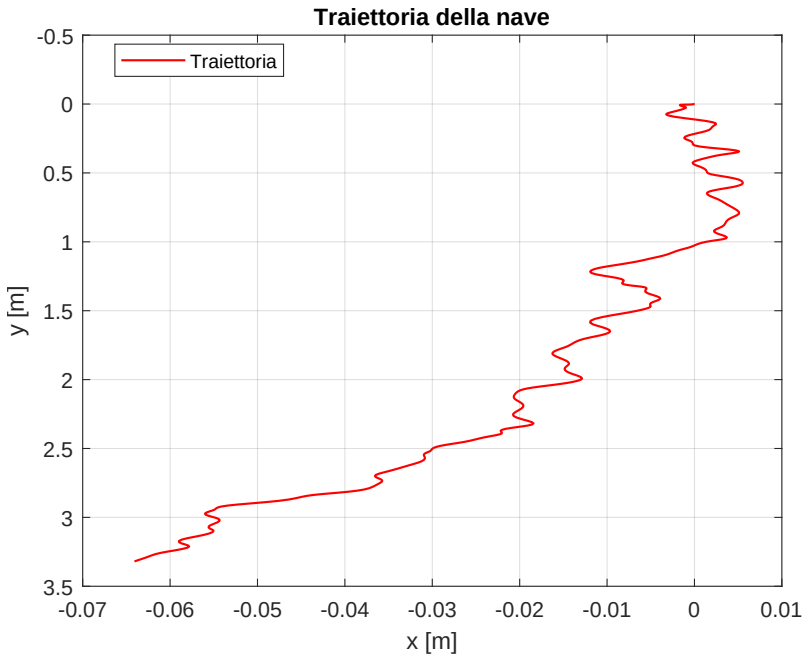


Figura 5.1: *Traiettoria nel piano (x, y) nel caso 270°*

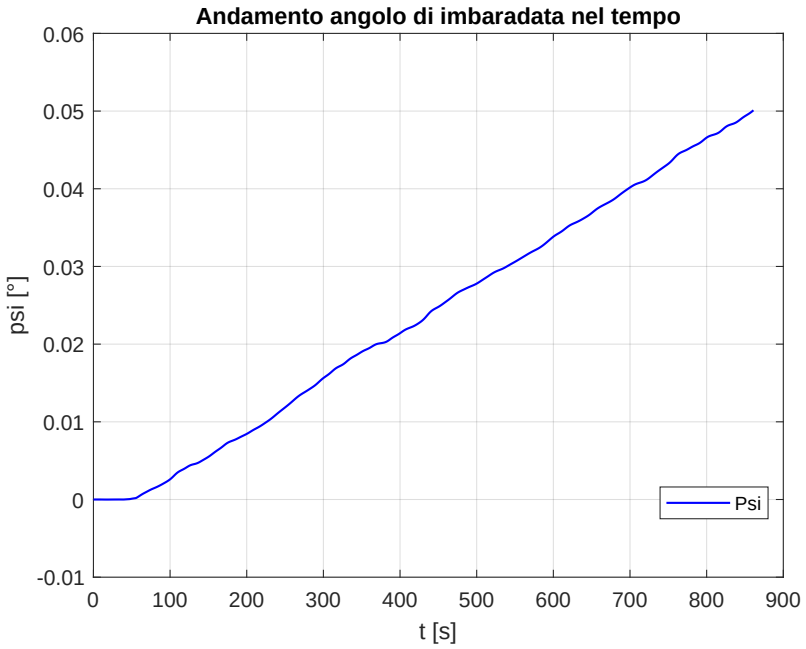


Figura 5.2: *Andamento angolo d'imbardata nel caso 270°*

Risultati caso 180°

In figura 5.3 e 5.4 vengono riportati rispettivamente la traiettoria percorsa dall'imbarcazione e l'andamento dell'angolo di imbardata ψ durante la simulazione, nel caso in cui la direzione dei disturbi risulti avere media di 180°.

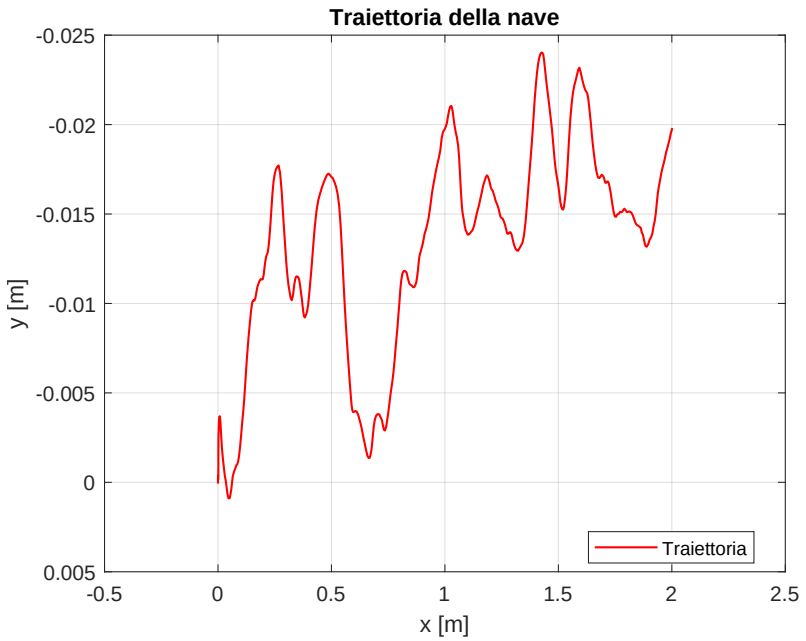


Figura 5.3: *Traiettoria nel piano (x, y) nel caso 180°*

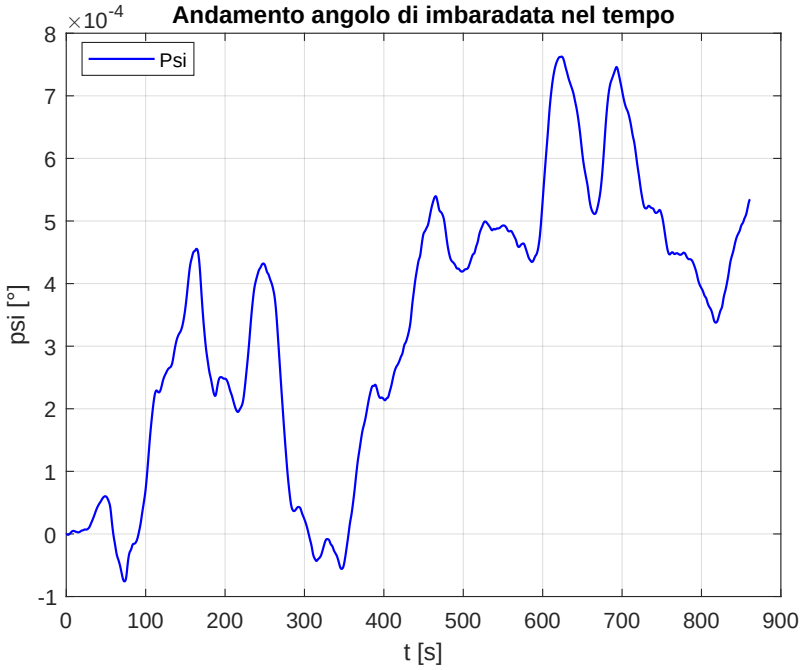


Figura 5.4: *Andamento angolo d'imbardata nel caso 180°*

Risultati caso 45°

In figura 5.5 e 5.6 vengono riportati rispettivamente la traiettoria percorsa dall'imbarcazione e l'andamento dell'angolo di imbardata ψ durante la simulazione, nel caso in cui la direzione dei disturbi risulti avere media di 45°.

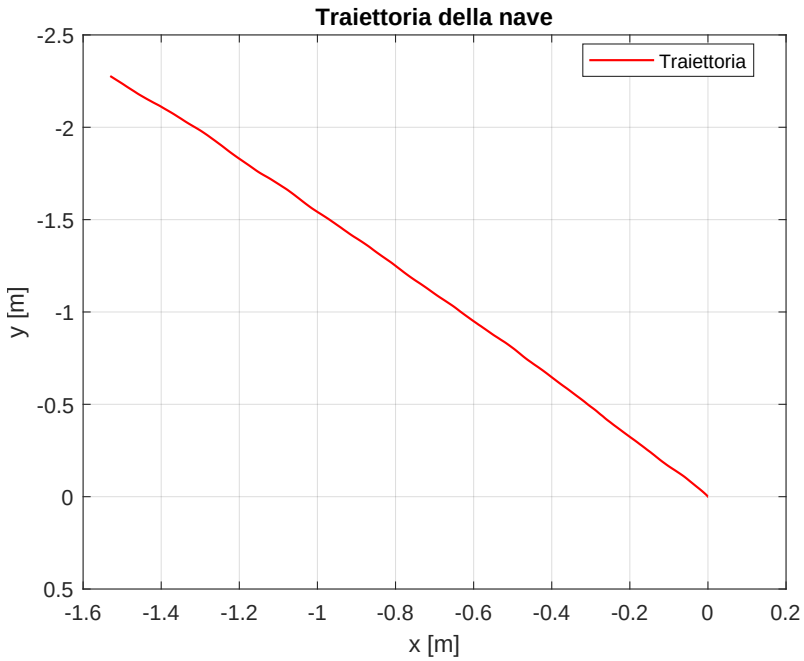


Figura 5.5: *Traiettoria nel piano (x, y) nel caso 45°*

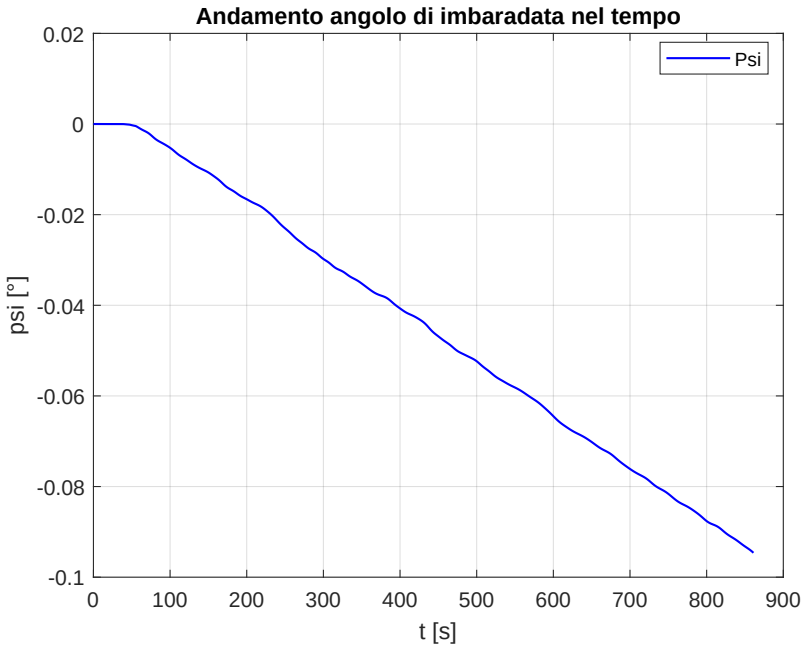


Figura 5.6: *Andamento angolo d'imbardata nel caso 45°*

Capitolo 6

Conclusioni

Il lavoro svolto in questa tesi ha avuto come obiettivo principale lo studio, lo sviluppo e la validazione di modelli matematici per la simulazione in tempo reale di sistemi di posizionamento dinamico, con particolare attenzione al problema dell'allocazione della spinta.
Dopo una prima fase introduttiva e di analisi dello stato dell'arte, l'attenzione si è concentrata sulla formulazione e sull'implementazione di diversi algoritmi di allocazione, applicati ad un caso di studio realistico e validati attraverso delle simulazioni.
I valori ottenuti dalle simulazioni hanno dimostrato come i modelli implementati risultino capaci di garantire il posizionamento dell'unità navale, restituendo comportamenti dinamici coerenti con quanto ci si aspetta da un sistema di posizionamento dinamico reale.
Questo conferma, quindi, la correttezza dei modelli sviluppati e la validità delle strategie di allocazione implementate.
In conclusione, il sistema, nonostante le ipotesi semplificative adottate, è stato in grado di replicare scenari realistici di risposta della nave ai disturbi esterni, mostrando la robustezza degli algoritmi proposti. Lo studio ha fornito, quindi, risultati coerenti e utili, che potranno costituire una base di partenza per sviluppi futuri, come la validazione sperimentale dei modelli attraverso prove su simulatore.

Bibliografia

[1] Tor A. Johansen *e* Thor I. Fossen, *Control allocation-A survey*, 2013.

[2] Asgeir J. Sorensen, *A survey of dynamic positioning control systems*, 2011

[3] J. Dang *e* H. Laheij, *Hydrodynamic aspects of steerable thrusters*, 2004

[4] S. Donnarumma *et al.*, *Probabilistic operability and greenhouse gas assessment during dynamic positioning operations*, 2023

[5] M. Martelli *et al.*, *A time-domain methodology to assess the dynamic positioning performances*, 2022

[6] DNVGL, *Assessment of station keeping capability of dynamic positioning vessels*, 2018

[7] UNIGE, *Progetto ARES WPA1.2 Ship DP, Deliverable D1.2.1a - Studio e calibrazione di un sistema DP-2 per una nave in condizioni standard*, 2020

[8] M. Martelli, *Dispense del Corso di Impianti di Propulsione Navale*, 2020