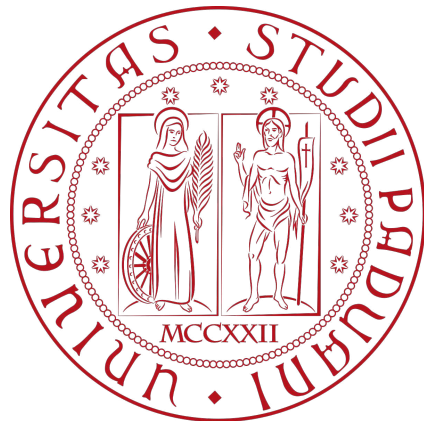


Università degli Studi di Padova
Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica

TESI MAGISTRALE

**Caratterizzazione sperimentale ed
implementazione di un controllo
MPPT di un azionamento di un
convertitore elettromeccanico per lo
smorzamento del moto ondoso**



Relatore

Mauro Andriollo

Correlatori

Andrea Tortella

Luca Martinelli

Laureando

Giulio Capovilla

Anno accademico

2023-2024

Sommario

Nel presente progetto di tesi si ha interesse a validare sperimentalmente e ottimizzare il controllo MPPT per un dispositivo galleggiante che combina, in maniera complementare, la funzione di frangionde (attenuando l'energia incidente del moto ondoso a protezione delle strutture costiere) con la conversione di tale energia in elettrica. Le caratteristiche delle onde del Mediterraneo rendono poco remunerativi gli impianti già installati in altri Paesi. Si è allora scelto di sviluppare un dispositivo concepito per le specificità della conformazione marina e costiera italiana e per le esigenze delle strutture turistico-commerciali coinvolte.

Dopo una rapida introduzione sulle fonti rinnovabili, concentrandosi in particolare sul recupero di energia da moto ondoso, saranno fornite delle premesse teoriche per ricavare l'Equazione di Cummins per sistema a 2 gradi di libertà. Definiti numericamente i coefficienti idrodinamici del dispositivo attraverso analisi BEM in NEMOH, per effettuare la validazione di tali coefficienti verrà descritto l'apparato sperimentale, analizzando in maniera specifica i risultati ottenuti dalla Prova di Radiazione e costruendo un modello matematico in Simulink del galleggiante. Per la parte di controllo bisognerà in un primo momento definire le condizioni tali da garantire risonanza, quindi successivamente indagare la massima estrazione di potenza attraverso l'algoritmo di Hooke e Jeeves. Per concludere saranno presentati i risultati sperimentali ottenuti dalle prove di controllo MPPT.

Tale lavoro di tesi si propone di essere diretto proseguo di quanto contenuto in [9].

Indice

Sommario

1	Introduzione	1
1.1	Fonti rinnovabili	2
1.2	Moto ondoso	5
1.2.1	Distribuzione energia da moto ondoso	6
1.2.2	Problematiche e sfide	8
1.3	Wave Energy Converters	9
1.3.1	Classificazione rispetto alla posizione	9
1.3.2	Classificazione rispetto al funzionamento	10
1.4	Descrizione dell'apparato oggetto di studio	13
2	Premesse teoriche e analisi numerica dei coefficienti idrodinamici	17
2.1	Equazione di Moto	18
2.1.1	Equazione di Moto nel dominio delle frequenze a 1 DOF	20
2.1.2	Equazione di Moto nel dominio del tempo a 1 DOF . .	21
2.1.3	Equazione di Moto nel dominio della frequenza a 2 DOF	23
2.2	Determinazione numerica dei coefficienti idrodinamici	25
2.2.1	Boundary Element Method	26
2.2.2	Definizione numerica dei coefficienti idrodinamici attraverso analisi NEMOH	27
2.2.3	Problematica del "moon pool"	31
3	Validazione sperimentale	35
3.1	Descrizione dell'apparato sperimentale	35
3.1.1	Canale di prova	35
3.1.2	Configurazione meccanica e strumenti di misura	37
3.1.3	Azionamento elettrico e sistema di controllo	38
3.2	Analisi teorica delle prove sperimentali	41
3.2.1	Prova di Radiazione	41

3.2.2	Prova di Eccitazione	43
3.2.3	Prova a galleggiante libero	43
3.3	Prova di Radiazione Sperimentale	44
3.3.1	Sfasamento Posizione-Forza	45
3.3.2	Centro di rotazione	50
3.3.3	Definizione sperimentale dei coefficienti idrodinamici a 2 DOF	52
3.3.4	Risposta impulsiva radiativa	57
3.3.5	Risposta impulsiva radiativa sperimentale	60
3.4	Modello Simulink galleggiante	61
3.4.1	Risultati analisi Simulink	62
4	Modellizzazione del controllo e simulazione numerica	67
4.1	Basi teoriche per il controllo	67
4.1.1	Definizione delle condizioni di risonanza	68
4.1.2	Applicazione dell'algoritmo MPPT	70
4.2	Simulazione numerica dell'algoritmo MPPT	72
5	Implementazione e validazione sperimentale del sistema di controllo	75
5.1	Analisi teorica dei parametri di controllo	76
5.1.1	Analisi numerica preliminare	77
5.2	Validazione sperimentale	81
5.2.1	Risultati sperimentali	83
	Conclusioni	89
	Bibliografia	91

Capitolo 1

Introduzione

La generazione di energia sfruttando fonti rinnovabili ha avuto un notevole sviluppo negli ultimi anni, in particolare a partire dalla crisi energetica del 1973 dovuta a problematiche geopolitiche, la quale determinò un brusco aumento del prezzo del greggio e dei suoi derivati.

Ulteriore impulso alla diffusione di fonti rinnovabili si è verificato a dicembre del 2019 quando è stato presentato dalla Commissione Europea il Green New Deal, ovvero un insieme di strategie e piani d'azione preposti a combattere il degrado ambientale verso un nuovo concetto di economia verde, moderna e competitiva. Attraverso questo patto sono state avanzate proposte in materia di clima, trasporti ed energia, ponendosi come obiettivo una riduzione delle emissioni nette di gas a effetto serra di almeno il 55% entro il 2030 rispetto ai livelli del 1990 [22]. Gli Stati membri dell'UE, aderendo a tale piano, si sono imposti un obiettivo giuridicamente vincolante, basato su una valutazione d'impatto effettuata dalla stessa Commissione Europea.

Al fine di raggiungere i traguardi proposti, ogni Nazione ha dovuto proporre un piano nazionale integrato su energia e clima della durata di 10 anni, il quale è stato definito da parte dell'Italia nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (PNRR). Per ottemperare gli obblighi internazionali l'Italia ha stanziato una totalità di 24 miliardi di euro per la transizione ecologica e la mobilità sostenibile, con un secondo obiettivo più futuribile di diventare nazione carbon neutral entro il 2050 [6].

Nel presente Capitolo si andranno ad analizzare gli sviluppi negli ultimi decenni in materia di fonti rinnovabili, analizzando vantaggi e problematiche da affrontare in maniera combinata con un'analisi economica globale sugli investimenti. Verranno quindi presentate le potenzialità e le principali forme di generazione da moto ondoso, classificando i dispositivi rispetto alla posizione e rispetto al funzionamento. Infine, verrà descritto sinteticamente l'apparato oggetto di studio, utilizzato per le analisi nel presente elaborato.

1.1 Fonti rinnovabili

L'energia è la grandezza fisica che va a definire la capacità di un corpo o un sistema fisico di compiere lavoro. È possibile ottenere in natura diverse forme di energia, tra le cui si possono distinguere le principali in energia chimica, meccanica, elettrica, elettromagnetica, nucleare e termica. È inoltre di particolare rilevanza categorizzare le energie in rinnovabili e non rinnovabili. Le fonti di energia rinnovabile sono definite come quelle fonti energetiche non soggette ad esaurimento in quanto naturalmente integrabili da processi fisici in una scala temporale umana. Nel caso contrario si hanno fonti non rinnovabili. In Figura 1.1 è riportato lo sviluppo dal 2000 al 2021 della produzione di energia attraverso fonti rinnovabili e non, a livello globale. È immediato osservare che considerando i dati riferiti al 2021 buona parte della produzione deriva da petrolio (30%), carbone (27%) e gas naturale (22%), tutte fonti di energia non rinnovabile. La componente legata alle fonti rinnovabili risulta inferiore al 7%, alle quali bisogna però aggiungere l'idroelettrico (6,5%) e il nucleare (5%), entrambe tecnologie considerate non rinnovabili ma di gran lunga meno impattanti sull'ambiente rispetto ai combustibili fossili.

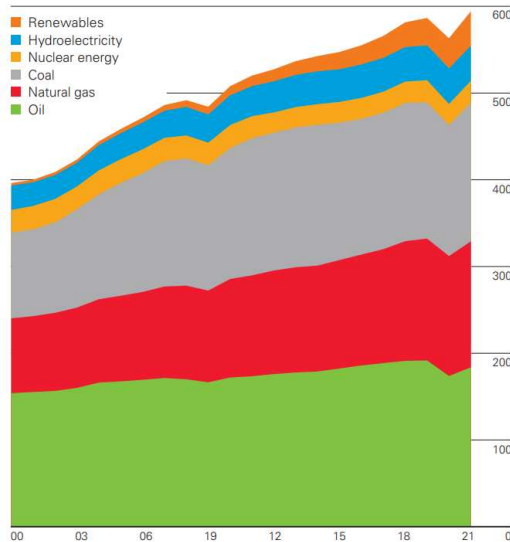


Figura 1.1: Utilizzo fonti rinnovabili e non dal 2000 al 2021 a livello globale [4]

È però necessario osservare che i dati ottenuti a livello globale devono poi essere differenziati Nazione per Nazione. Consideriamo a titolo di esempio i casi di Stati Uniti e Cina, due delle nazioni con maggiori consumi energetici a livello globale. Si ha negli Stati Uniti un'estrazione e un consumo

primariamente legato al petrolio e al gas naturale con un ridotto utilizzo del carbone. In Cina si ha invece una situazione diametralmente opposta, dove il carbone permane la principale fonte energetica del Paese, con tutte le conseguenze in termini di inquinamento dell'aria e quindi di salute per i lavoratori delle miniere e per i civili stessi. D'altra parte, in Cina negli ultimi anni si è presentato un maggiore sviluppo nelle fonti rinnovabili e dell'ambito idroelettrico. In entrambi i casi, come a livello globale, si nota uno sviluppo sempre crescente della generazione di energia da fonti rinnovabili.

Le principali problematiche inerenti le fonti non rinnovabili possono essere riassunte a seguire:

- Sono presenti in quantità limitata, con formazione di nuovi depositi in tempi troppo lunghi rispetto alle esigenze umane. Ipotizzando un consumo costante pari a quello odierno di petrolio, senza la scoperta di nuovi giacimenti, si otterrà un esaurimento totale delle scorte di petrolio entro il 2065 [4].
- I combustibili fossili rappresentano la principale fonte di inquinamento al mondo. I gas rilasciati durante la combustione di queste sostanze hanno determinato l'innalzamento della temperatura globale, con conseguente scioglimento dei poli artici e aumento del livello del mare, desertificazione e complicazioni in materia di salute umana.
- I combustibili fossili presentano una forte variabilità nel prezzo e sono particolarmente suscettibili a manipolazioni di mercato. Infatti, essendo presenti depositi in sole poche zone nel mondo, si sono verificati numerosi scontri politici e commerciali nella storia recente per ottenerne il controllo. Conseguenza di questo è una condizione di tensione politica destinata a crescere al diminuire delle risorse attualmente disponibili. L'energia rinnovabile, in più varia forma, potrebbe invece essere sviluppata e ottenuta da tutte le Nazioni del mondo, riducendo i possibili rapporti di sudditanza fra Stati.
- Si hanno elevati costi in fase di produzione. Differentemente dalle centrali da fonti rinnovabili dove si ha un grande investimento iniziale e poi costi quasi nulli per ricavare elettricità, si ha la necessità di acquistare i combustibili fossili, i quali come detto precedentemente sono suscettibili a forte variabilità di prezzo. È inoltre necessario un livello maggiorato di manutenzione durante la vita dell'impianto rispetto a quanto si possa avere per impianti fotovoltaici o eolici.

Lo sviluppo di energia rinnovabile ha avuto inizio nelle ultime decadi del ventesimo secolo ma ha avuto i principali sviluppi solo negli ultimi 20

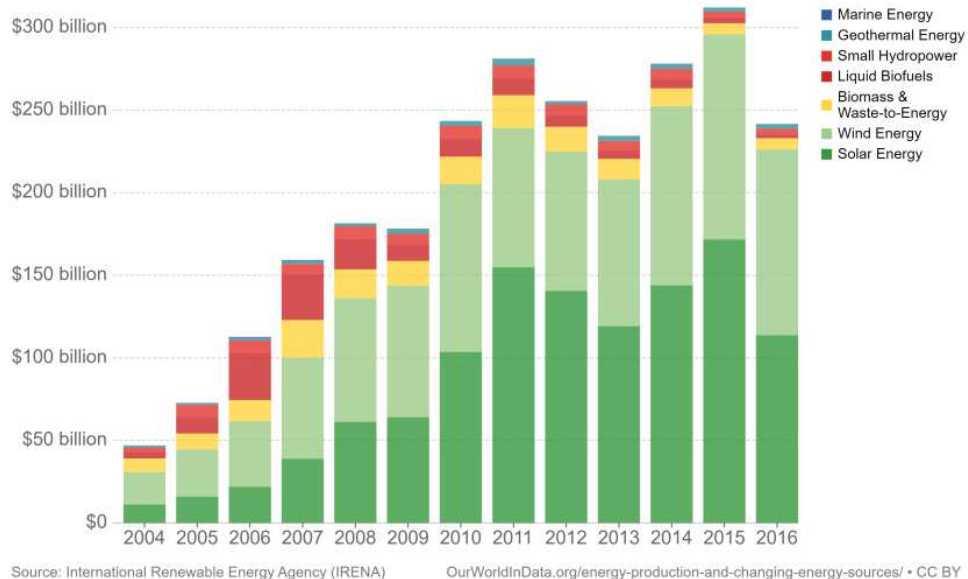


Figura 1.2: Investimenti in fonti rinnovabili dal 2004 al 2016 [7]

anni. È possibile osservare in Figura 1.2 gli investimenti a livello globale in materia di energia rinnovabile dal 2004 al 2016. Si può facilmente notare la predominanza di impianti fotovoltaici ed eolici, le tecnologie rinnovabili più mature e collaudate attualmente insieme all'idroelettrico.

L'opinione pubblica si è profondamente modificata nel corso degli ultimi anni, conseguentemente alle conferenze di Rio (1992), Kyoto (1997) e Parigi (2016) e agli studi effettuati inerenti al cambiamento climatico nell'ultimo secolo. È poi particolarmente rilevante osservare che, insieme allo sviluppo delle tecnologie rinnovabili, è seguita una forte riduzione dei prezzi di generazione. A titolo di esempio portiamo le tecnologie fotovoltaiche, le quali hanno avuto una variazione di prezzo da $0,55 \$/kWh$ nel 1980 a $0,05 \$/kWh$ nel 2012 [12]. Questi dati ci permettono di osservare che tecnologie attualmente in fase di ricerca con costi di investimento elevati, se ottimizzate e portate a commercializzazione, presentano una forte riduzione dei costi e di conseguenza una maggiore competitività nel mercato.

È infine possibile analizzare la situazione in Italia dal punto di vista dell'utilizzo di energia proveniente da fonti rinnovabili in Figura 1.3. Risulta immediato osservare una forte riduzione dell'utilizzo di petrolio, a fronte però della crescita di centrali turbogas, le quali sfruttano gas naturale. Gli eventi avvenuti negli ultimi anni non sono altro che l'ennesimo monito a cercare di disaccarsi dall'utilizzo dello stesso gas naturale, prevalentemente importato dall'estero, con oscillazioni di prezzo spesso dovute a questioni prettamente

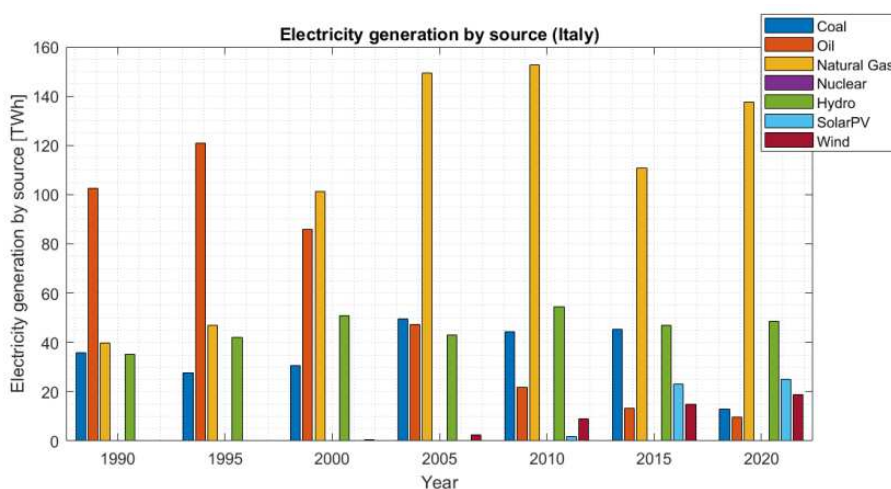


Figura 1.3: Produzione in Italia da fonti rinnovabili dal 1990 al 2020 [1]

politiche. Nonostante la crescita di produzione di energia elettrica da fonti rinnovabili sono necessari ancora notevoli sviluppi in termini di investimenti per adempiere alle richieste prefissate dal PNRR. In maniera combinata è poi necessario un grande lavoro di ricerca scientifica atta a sviluppare tecnologie tali da permettere questo sviluppo, dalle centrali alla gestione della rete elettrica nazionale.

1.2 Moto ondoso

Fra le possibili energie rinnovabili quella derivante da moto ondoso risulta la meno sfruttata, nonostante stia avendo un forte sviluppo in ambito di ricerca negli ultimi anni. I mari e gli oceani occupano all'incirca il 70% della totale superficie terrestre e a livello di densità energetica, per l'energia da modo ondoso, si stimano dei valori di molto maggiori rispetto alle altre energie rinnovabili. È stato infatti calcolato che un'onda è in grado di trasportare circa 25 kW/m a lunghezza d'onda unitaria e 1 metro di valor di cresta, a fronte di 1 kW/m^2 ottenuto per fotovoltaico ed eolico rispettivamente a irraggiamento massimo e velocità del vento di 12 m/s per generatore da $1,5 \text{ MW}$ [8]. Oltre a quanto osservato, si tratta di una risorsa rinnovabile non intermittente e prevedibile giornalmente diversamente dai venti e dal sole. Nonostante gli indiscutibili vantaggi è però necessario osservare che, all'attuale livello di sviluppo tecnologico, una diffusione commerciale dei vari convertitori di energia da moto ondoso non è ancora possibile. Le uniche centrali con una certa

rilevanza in termini produttivi sono situate in Portogallo, UK e Australia, con però principale funzione di ricerca.

Sono stati ottenuti numerosi progressi in materia di progettazione e utilizzo di dispositivi Wave Energy Converter (WEC), i quali vanno a convertire l'energia meccanica del moto ondoso in energia elettrica attraverso un sistema di Power Take Off (PTO). Uno degli aspetti più critici al fine di permettere una diffusione della tecnologia analizzata, quindi ad un prezzo competitivo, consiste nell'ottimizzare il controllo del PTO per ottenere massima estrazione di energia dal WEC. Una descrizione estesa delle possibili metodologie di controllo utilizzate si può trovare in [24].

1.2.1 Distribuzione energia da moto ondoso

L'origine delle onde deriva dalla radiazione luminosa prodotta dal Sole la quale comporta un aumento di temperatura eterogeneo fra le masse d'aria nella Terra, generando una differenza di pressione che porta alla formazione dei venti. Questi, incidendo sulla parte superiore della superficie marina ne trasferiscono parte della loro energia cinetica. Per attrito viscoso gli strati più superficiali inducono il moto a quelli sottostanti portando alla formazione delle onde marine.

Prima di classificare le diverse tecnologie attraverso cui è possibile prelevare energia dalle onde, risulta rilevante analizzare le stime di potenziale energetico effettuate per il Mar Mediterraneo e poi per tutto il globo. Analizzando Figura 1.4 (a sinistra) e Figura 1.5 risulta immediato osservare come il Mar Mediterraneo presenta ridotti valori di potenziale energetico se confrontato a quanto si possa ottenere negli oceani [26]. Essendo le dimensioni del bacino ridotte, si ottengono delle onde caratterizzate da altezze meno elevate e periodi inferiori rispetto a quanto si osserva negli oceani. Il Mar Mediterraneo è inoltre caratterizzato da lunghi intervalli di mare calmo mentre sono limitati quelli ad onde molto più elevate. A livello costruttivo bisognerebbe allora andare a progettare dei dispositivi in grado di sostenere i periodi in cui la struttura è maggiormente sollecitata, per poi avere in buona parte del suo funzionamento applicazione a carico ridotto. D'altra parte, la presenza di lunghi periodi di mare calmo risulta ottimale per finalità di ricerca, permettendo una maggiore agibilità nel fare test e opportune manutenzioni.

Non è attualmente ancora disponibile, data la difficoltà nell'effettuare le misurazioni, una stima dettagliata e completa dell'energia potenziale ricavabile da moto ondoso per i mari italiani. Al momento tutte le informazioni di cui disponiamo sono quelle ottenute dalle 15 boe installate lungo il perimetro delle coste italiane dalla Rete Ondametrica Nazionale (RON), attiva dal 1989 e gestita dal Servizio Mareografico dell'Istituto Superiore per la Protezione e

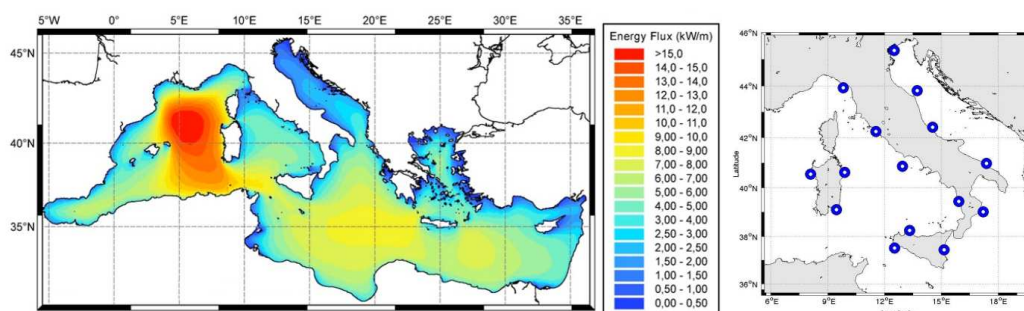


Figura 1.4: Potenziale di energia da moto ondoso medio annuale sul Mediterraneo [26] e localizzazione boe RON

la Ricerca Ambientale (ISPRA). È possibile osservare la localizzazione di tali boe in Figura 1.4 (a destra). Come già analizzato l'energia del moto ondoso risulta relativamente bassa se confrontata con quella ricavabile dagli oceani. Tutte le boe sono state poste in acque profonde, ossia la profondità del sito è maggiore della metà del massimo della lunghezza d'onda in quel punto. In questo modo risulta molto più dettagliato il calcolo del flusso di energia generato da moto ondoso. Il moto ondoso risulta maggiormente intenso durante la stagione invernale e autunnale, con i valori più elevati nella zona del golfo del Leone e nella zona compresa tra le isole Baleari e la Sardegna. Altra regione interessata da altezze d'onda significative è quella del Canale di Sicilia e del Mar Ionio [21].

A livello globale è possibile osservare picchi di densità di energia da moto ondoso nelle coste irlandesi, alle coste con il Pacifico della parte superio-

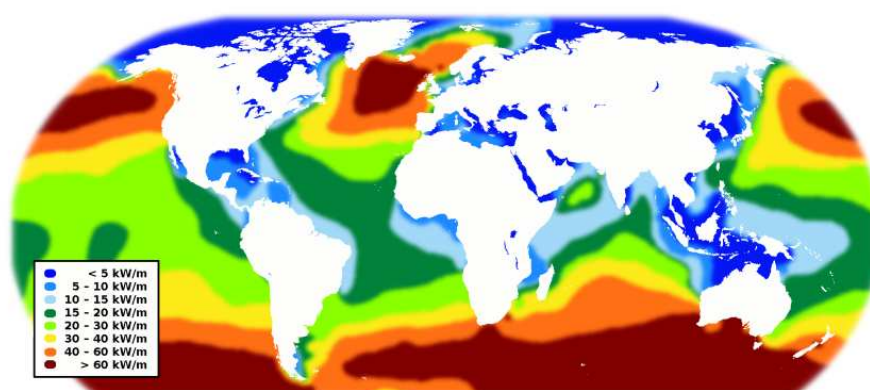


Figura 1.5: Potenziale di energia da moto ondoso medio annuale a livello globale [5]

re dell'America del Nord e quella inferiore dell'America del Sud, Sudafrica, Australia e Nuova Zelanda. Secondo delle stime globali la totale energia potenziale disponibile da moto ondoso globalmente è di circa $2,11 \pm 0.05$ TW [5], con distribuzione però non omogenea, come osservato. Sono stati poi fatti degli studi al fine di valutare quanto l'energia da moto ondoso possa contribuire alla domanda energetica in diversi Paesi. Il National Renewable Energy Laboratory (NREL) ha stimato che negli Stati Uniti l'energia da moto ondoso potrebbe produrre 1170 TWh all'anno, contribuendo al 5 % del consumo annuale medio per ogni cittadino, includendo trasporti, riscaldamento e le industrie [5].

1.2.2 Problematiche e sfide

Insieme ai vantaggi e alle potenzialità derivanti dalla produzione di energia da moto ondoso prima citati risulta importante analizzarne le problematiche. I principali aspetti sono:

- gli effetti dovuti al rumore e alla presenza di campi elettromagnetici causati dal sistema di generazione, i quali possono comportare degli effetti sulla fauna circostante;
- la stessa presenza strutturale dei dispositivi in mare va inevitabilmente a modificare l'ambiente marino, allontanando o avvicinando possibili specie acquatiche;
- si ha il rischio di colpire animali marini attraverso parti attive in movimento (una turbina ad esempio);
- forte impatto sulla pesca in quanto gli impianti porterebbero a zone nelle quali questa verrebbe totalmente esclusa;
- l'effetto dovuto alla rimozione stessa dell'energia dalle onde la quale porterebbe degli effetti anche a valle dell'impianto, in particolare nella zona costiera.

Le problematiche sono numerose oltre a quelle già citate. Si può facilmente desumere che, per tutti i punti elencati, si ha un elevato grado di incertezza e una carenza di dovute analisi. Molti svantaggi potrebbero essere portati a vantaggi se seguiti da una dovuta attenzione. In parallelo alla ricerca per ottenere dei dispositivi in grado di generare energia da moto ondoso sarà quindi necessario un esteso studio nei vari ambiti della biologia marina per verificarne l'effettiva sostenibilità.

1.3 Wave Energy Converters

Nel corso delle ultime decadi sono stati proposti numerosi dispositivi atti al recupero di energia dal mare. I principi fisici attraverso i quali si vuole avere produzione energetica possono essere di vario tipo: differenza di temperatura e di salinità, correnti marine, maree, moto ondoso e molte altre. Nel presente articolo verranno analizzati con maggior attenzione i dispositivi di recupero energetico da moto ondoso, ovvero i Wave Energy Converters.

I WECs sono in grado di convertire l'energia meccanica trasmessa dall'onda in un'altra forma di energia, spesso elettrica, al fine di ottenere una fonte rinnovabile per il recupero energetico. Possono essere classificati sia per posizione che per principio di funzionamento.

1.3.1 Classificazione rispetto alla posizione

In funzione della posizione in cui sono stabiliti gli impianti di produzione è possibile sviluppare una prima classificazione.

- **Onshore WECs:** i quali sono costruiti direttamente nella costa. Fra i vari impianti rappresentano quelli con un più grande impatto ambientale. La costruzione di essi determina la cementificazione di zone costiere con tutti gli effetti annessi per le specie marine. Inoltre, spesso sono impianti che sfruttano grandi turbine ad aria o ad acqua, causando rumore e disturbo nelle vicinanze. D'altra parte, nonostante il grande investimento iniziale tendenzialmente correlato a tali tecnologie, si vanno ad evitare molte sfide tecnologiche. Essendo collocate a terra le apparecchiature per la conversione energetica, risulta meno problematica la gestione e la manutenzione dell'impianto, e soprattutto risulta molto più semplice la gestione del collegamento fra l'impianto e la rete elettrica stessa. Una soluzione consiste nell'integrare tale tecnologia in zone portuali dove un processo di cementificazione risulta preesistente.
- **Nearshore WECs:** posizionati nelle zone ad acqua poco profonda in prossimità della costa. Tali dispositivi sono spesso totalmente sommersi, causando quindi un impatto ridotto a livello visivo. Tuttavia, la loro presenza può causare delle problematiche andando ad interagire con le pratiche umane, come la pesca e la navigazione. È necessario poi, come illustrato nella precedente sezione, stabilire l'impatto di tale tecnologia sulla fauna marina in prossimità della costa.

-
- **Offshore WECs:** disposti in acque profonde e in lontananza dalle coste. Come nel caso precedente si ha il grande vantaggio di avere impatto visivo ridotto o nullo. Si ha inoltre un maggiore potenziale energetico, rendendo questa la tipologia più promettente di tecnologia Wave Energy Converter. Nonostante questo, si ricorda la necessità di valutare in maniera attenta l'impatto ambientale oltre al fatto che, essendo disposti in acque profonde, possono essere soggetti a condizioni meteorologiche molto più critiche che nei casi prima analizzati. Ultimo aspetto da considerare è il collegamento stesso fra impianto e terra ferma, il quale dovrebbe essere fatto utilizzando cavi marini, incrementando di molto l'investimento iniziale, oltre alle difficoltà per la gestione e la manutenzione.

1.3.2 Classificazione rispetto al funzionamento

Possiamo ora considerare una classificazione in funzione della tipologia di WEC. Gli esempi descritti sono presentati in Figura 1.6.

- **Oscillating Water Columns (OWCs)**, dispositivi che possono essere posti sia onshore che offshore e sono caratterizzati dalla presenza di una camera d'aria. A causa del movimento dell'onda l'aria viene compressa, venendo quindi inviata ad una turbina ad aria la quale genera elettricità. Si osserva che la turbina causa un elevato rumore e presentando componenti attive sommerse potrebbe andare a colpire animali marini (Figura 1.6(a)).
- **Oscillating Wave Surge Converters**, caratterizzati da una struttura fissata al fondale marino e una parte oscillante direttamente connessa (Figura 1.6(b)). L'energia viene convertita a partire dal movimento della parte oscillante, dovuta principalmente alle correnti marine. Principali svantaggi sono dati dalla presenza di parti attive che potrebbero causare collisioni con le specie marine circostanti, oltre ad una complessità nella manutenzione dell'impianto dovuta alla localizzazione al di sotto della superficie.
- **Overtopping Devices**, costruiti tipicamente in prossimità delle coste ad un'altezza poco maggiore rispetto al livello del mare, andando a riempire una vasca per mezzo del flusso di onde. L'energia potenziale dell'acqua viene poi sfruttata attraverso delle turbine a basso salto (Figura 1.6(c)). Si hanno le problematiche del rumore, oltre al dover cementificare grandi parti di costa.

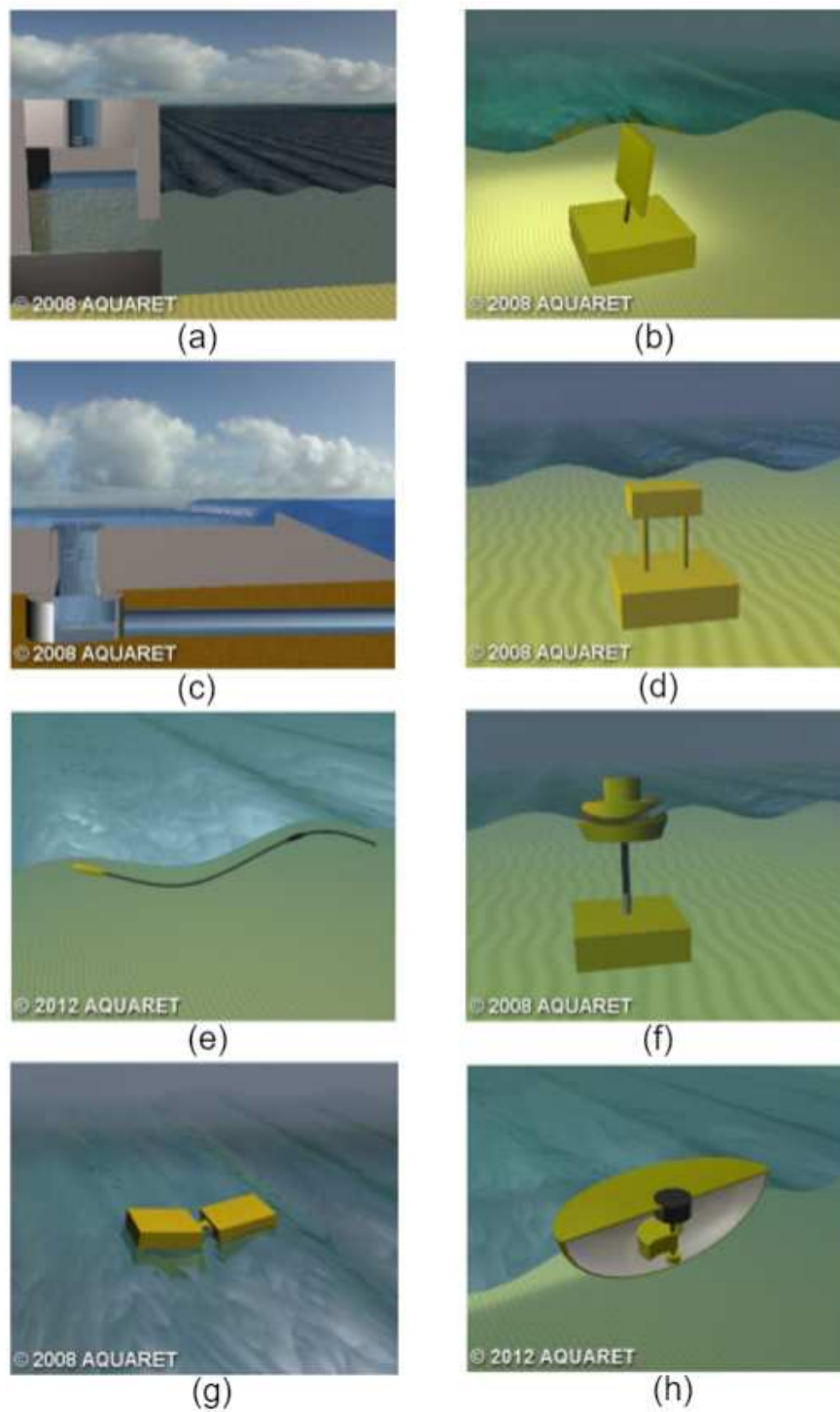


Figura 1.6: Struttura schematica dei più comuni dispositivi WEC [10]

-
- **Submerged Pressure Differential (SPD)**, tecnologia più recente rispetto a quelle degli altri WEC citati. Presenta delle membrane in grado di catturare la differenza di pressione in diverse zone al di sotto dell'onda. Tale principio permette di sfruttare un sistema di PTO attraverso il fluido che viene guidato in una turbina e quindi al generatore elettrico. In Figura 1.6(d) e 1.6(e) è possibile osservare due diverse classi di SPD: nel primo caso si ha una struttura fissa bloccata al fondale, con una componente oscillante che va a sfruttare la differenza di pressione generata dalle onde; nel secondo caso invece il dispositivo presenta forma lunga e filamentare, disposto in prossimità della superficie, con opportuni sistemi di ancoraggio. Anche in questo caso presenti parti attive fonti di pericolo per le specie marine.
 - **Point Absorber (PA)**, rappresentanti delle boe che possono essere poste sia in superficie che sommerse. Considerando il moto verticale della boa è possibile utilizzare un sistema di PTO attraverso generatore lineare o rotativo in seguito ad una conversione meccanica del moto. La presenza del generatore determina rumore e creazione di campi elettromagnetici, con conseguente grande impatto ambientale (Figura 1.6(f)).
 - **Surface-Following Attenuator (SFA)**, dispositivi galleggianti sviluppati in lunghezza, in posizione perpendicolare rispetto al moto dell'onda (Figura 1.6(g)). Attraverso l'oscillazione delle sue componenti è quindi possibile azionare un convertitore elettromeccanico con conseguente generazione di energia elettrica. Essendo in superficie determina forte impatto visivo.
 - **Rotating Mass Generators**, tipicamente costituiti da una componente galleggiante nel quale sono contenute una o più masse rotanti. Il movimento combinato delle masse rotanti e quello dello scafo, dovuto alla presenza delle onde, determina una coppia giroscopica poi sfruttabile attraverso sistema PTO rotazionale. Anche tale dispositivo ha lo svantaggio di presentare parti mobili (Figura 1.6(h)).

In Tabella 1.1 è possibile osservare i principali impianti di produzione di energia elettrica da moto ondoso a livello mondiale. Come già ripetuto più volte nel presente capitolo la tecnologia non ha ancora avuto sviluppo commerciale avendo per lo più impianti sperimentali, nonostante si possa osservare il Sostenas Wave Power Station, impianto Point Absorber da 3 MW creato in Svezia nel 2015.

Nome impianto	Località	Potenza [MW]	Tipologia	Anno
Ada Foah Wave Farm	Ghana	0.4	PA	2016
Agucadoura Wave Farm	Portogallo	2.25	SFA	2008
Azura	USA	0.02	PA	2015
BOLT Lifesaver	USA	0.03	PA	2016
Islay Limpet	Regno Unito	0.5	OWC	2000
Mutriku Breakwater Wave Plant	Spagna	0.3	OWC	2009
Pico Wave Power Plant	Portogallo	0.4	OWC	2010
SDE Sea Waves Power Plant	Israele	0.04	OWSC	2009
SINN Power wave energy converter	Grecia	0.02	PA	2015
Sotenäs Wave Power Station	Svezia	3	PA	2015
H24	Italia	0.1	SPD	2015

Tabella 1.1: Principali impianti di produzione di energia elettrica da moto ondoso [10]

1.4 Descrizione dell'apparato oggetto di studio

Nel presente elaborato si ha l'interesse di sviluppare un nuovo dispositivo di Wave Energy Converter. Questo consiste in un galleggiante con duplice funzionalità: la possibilità di fungere da frangionde (o Wave Attenuator-WA) riducendo l'incidenza del moto ondoso in corrispondenza dei porti turistici o commerciali e nel contempo operare come WEC andando a convertire l'energia incidente delle onde in elettricità.

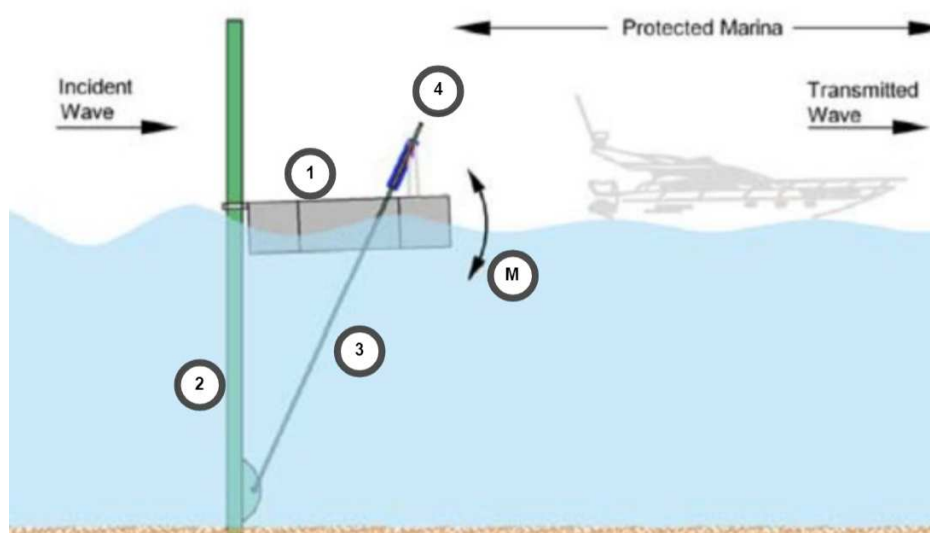


Figura 1.7: Schema di principio del dispositivo [17]

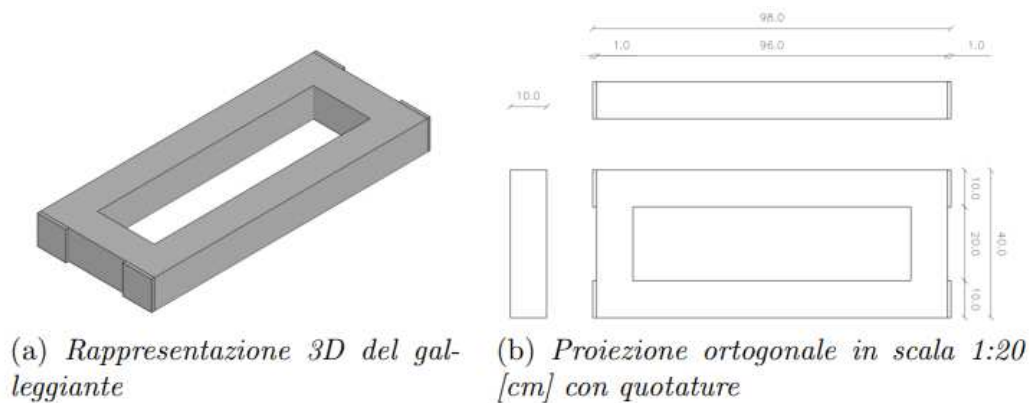


Figura 1.8: Geometria del galleggiante in oggetto di studio [17]

Le due funzioni non risultano scorrelate, si può avere infatti funzionamento da WEC con conseguente riduzione del moto ondoso, utilizzando un controllo attivo che consente di avere prestazioni migliori rispetto ad un dispositivo flottante con un'azione esclusivamente dissipativa.

È possibile osservare una rappresentazione del dispositivo discusso in Figura 1.7. Si ha un galleggiante (1), di cui si possono osservare una rappresentazione 3D e la proiezione ortogonale in scala 1:20 in Figura 1.8, incernierato a dei pali fissati sul fondale marino (2) attraverso guida scorrevole. Data la natura del vincolo creato, il galleggiante è in grado di effettuare il movimento verticale al vincolo nella sinistra della rappresentazione, e un movimento rotativo all'estremità non vincolata, come si può osservare in (M). Il recupero energetico viene effettuato attraverso l'azione di un braccio obliquo (3) fissato alla base del supporto immerso e all'estremità destra del galleggiante. Nella parte superficiale del palo obliquo (4) si va a porre il PTO in involucro impermeabile.



Figura 1.9: Fotografia WA sperimentale in scala 1:20

A tal fine è possibile utilizzare un generatore lineare a trasmissione diretta o un generatore rotativo azionato da ingranaggio meccanico in grado di convertire il movimento rotativo in lineare. In Figura 1.9 è possibile osservare un'immagine del WA utilizzato per le prove in laboratorio.

Infine, per comprendere al meglio la duplice funzione del dispositivo studiato, è utile specificare che i frangiflutti sono utilizzati in maniera diffusa nelle coste italiane e non solo da più di un centinaio di anni. Fino agli anni 80 erano costituiti generalmente da grandi masse di cemento, dal fondale alla superficie, costituendo delle installazioni permanenti e rigide. Dati però i costi elevati e la difficoltà nel costruire frangiflutti in acque profonde sono stati sviluppati negli ultimi decenni dei nuovi dispositivi galleggianti, i quali hanno come obiettivo la riduzione del materiale edile necessario, quindi i costi complessivi dell'opera. I frangiflutti del tipo FCA (Frangiflutti in Cemento Armato) sviluppati dalla INGEMAR sono costituiti in prefabbricati di cemento armato, con nucleo in polistirene espanso. Esempio di tale installazione si trova in Figura 1.10, dove si può osservare un frangiflutto di 10 metri di lunghezza e 2,40 metri di altezza complessiva, con installazione in parallelo a La Spezia creando una barriera con una lunghezza totale di 360 metri [11]. La preesistenza di tali strutture permette alla tecnologia in analisi nel presente elaborato di svolgere una funzione complementare, senza la necessità di creare nuove strutture al fine di produrre energia, ma sfruttando quelle già esistenti.



Figura 1.10: Modulo di frangiflutti INGEMAR installato a La Spezia [11]

Capitolo 2

Premesse teoriche e analisi numerica dei coefficienti idrodinamici

Dopo aver descritto nel Capitolo precedente le principali nozioni sul tema energetico, in particolare per il caso di energia da moto ondoso, e aver definito le caratteristiche dell'impianto oggetto di studio è ora necessario trattare a livello teorico gli aspetti utili per comprendere le analisi effettuate.

Nel documento [9], il cui presente elaborato si propone di essere un diretto proseguo, sono state trattate in maniera specifica diverse tematiche: la teoria delle onde lineari nel caso regolare e irregolare; la dinamica dei corpi rigidi; infine l'interazione fra una struttura immersa in acqua e l'onda incidente. Si rimanda allora a tale lavoro il lettore per un'analisi dettagliata degli aspetti teorici.

Nel presente Capitolo verrà analizzata in maniera più specifica la formulazione dell'Equazione di Moto, la quale va a rappresentare la dinamica di un corpo rigido all'interno di un fluido in moto, descrivendone nello specifico l'applicazione ad 1 e a 2 gradi di libertà, nel dominio del tempo e della frequenza. Al fine di avere uno strumento di verifica dei risultati sperimentali ottenuti, verrà descritto il Boundary Element Method, quindi il procedimento computazionale necessario per ottenere i coefficienti idrodinamici a livello numerico, con i risultati ottenuti per il WA utilizzato. Tale analisi numerica è stata effettuata attraverso implementazione in NEMOH.

2.1 Equazione di Moto

L'Equazione di Moto risulta la metodologia di caratterizzazione idrodinamica più utilizzata nella letteratura scientifica per andare a descrivere l'interazione di un corpo rigido oscillante (il frangiflutti nel nostro caso) con la superficie libera di un fluido. Per le analisi teoriche è stato utilizzato [13] come testo di riferimento.

Ci poniamo nell'ipotesi di piccole perturbazioni e, almeno per ora, di un solo grado di libertà (Degree Of Freedom-DOF) andando allora a scomporre le forze agenti sul galleggiante considerando il solo spostamento verticale. È possibile scrivere la seguente equazione della quale andremo a definire uno ad uno i diversi termini:

$$\mathbf{F}_{tot} = \mathbf{F}_{pto} + \mathbf{F}_{vinc} - \mathbf{F}_{drag} + \mathbf{F}_{wave} \quad (2.1)$$

Per la seconda legge della dinamica andremo a scrivere \mathbf{F}_{tot} come:

$$F_{tot} = M \cdot a \quad (2.2)$$

dove a indica l'accelerazione e M la massa immersa del galleggiante in condizioni statiche.

La \mathbf{F}_{pto} indica la forza esterna applicata al galleggiante dal Power Take Off (PTO), ovvero l'attuatore posto all'estremità non vincolata del WA.

La \mathbf{F}_{vinc} rappresenta invece la reazione vincolare dovuta alla presenza delle guide nel lato opposto del galleggiante rispetto al PTO, le quali permettono di avere il solo movimento verticale e mantenere fissato il galleggiante lungo l'asse orizzontale. A seguire verrà ipotizzata nulla la reazione vincolare in quanto, oltre alla difficoltà nell'effettuare una quantificazione esatta, sono state utilizzate delle nuove guide con giogo ridotto al minimo di modo da ottimizzare lo scorrimento e di conseguenza minimizzare le perdite per attrito.

È poi presente una forza dissipativa \mathbf{F}_{drag} dovuta all'attrito viscoso tra superficie della boa e il fluido. Questa può essere espressa a mezzo di un coefficiente di attrito viscoso B_V e risulta proporzionale alla velocità v del galleggiante rispetto all'asse verticale, definita quindi come:

$$F_{drag} = B_V \cdot v \quad (2.3)$$

Bisogna infine analizzare la forza dell'onda \mathbf{F}_{wave} incidente nella struttura nelle sue diverse componenti. È possibile scomporre la F_{wave} nella somma di tre contributi, a seguire meglio approfonditi.

$$F_{wave} = F_{gal} - F_{rad} + F_{ex} \quad (2.4)$$

CAPITOLO 2. PREMESSE TEORICHE E ANALISI NUMERICA DEI COEFFICIENTI IDRODINAMICI

F_{gal} indica la forza di galleggiamento, la quale rappresenta la componente idrostatica che tende a riportare la struttura nella sua condizione di equilibrio. Secondo la nota legge di Archimede la forza di galleggiamento può essere espressa direttamente come:

$$F_{gal} = -\varrho \cdot g \cdot V = -\varrho \cdot g \cdot A \cdot \xi \quad (2.5)$$

dove $\varrho = 1000 \text{ kg/m}^3$ rappresenta la densità dell'acqua, g la costante di gravità, V il volume del galleggiante. Quest'ultimo, per esigenze di analisi, è stato scomposto nel prodotto fra l'area superficiale A del galleggiante e la posizione ξ . Si può infine osservare che, a meno che per la posizione, F_{gal} è definita a mezzo di termini costanti. È possibile definire allora un termine di galleggiamento $C = \varrho \cdot g \cdot A$ tale per cui:

$$F_{gal} = -C \cdot \xi \quad (2.6)$$

F_{rad} è detta forza di radiazione ed è dovuta al movimento della struttura nel fluido. Descrivendola come integrale delle pressioni agenti sulla superficie immersa e applicando le condizioni di contorno F_{rad} tale forza può essere definita come:

$$F_{rad} = f_i \cdot a \quad (2.7)$$

dove f_i verrà sviluppata a seguire.

Come ultimo addendo si ha la forza di eccitazione F_{ex} risentita da una struttura investita da un campo di moto incidente, causata quindi dal potenziale di diffrazione, a sua volta sovrapposizione di un potenziale incidente ed uno di scattering. La formulazione risulta complessa e non funzionale ai fini delle analisi del presente elaborato. Si rimanda allora a [13] per una trattazione completa.

È possibile riscrivere la forza dovuta all'onda incidente F_{wave} come somma dei contributi prima scritti in maniera estesa:

$$F_{wave} = -C \cdot \xi - f_i \cdot a + F_{ex} \quad (2.8)$$

Uniamo allora quest'ultima alle varie analisi fatte in precedenza, riscrivendo l'Equazione (2.1) di Moto:

$$M \cdot a = F_{pto} - B_V \cdot v - C \cdot \xi - f_i \cdot a + F_{ex} \quad (2.9)$$

2.1.1 Equazione di Moto nel dominio delle frequenze a 1 DOF

Nella fase sperimentale verrà effettuata un'analisi nel dominio delle frequenze e non del tempo. Risulta allora necessario applicare la Trasformata di Fourier (TdF), ricordando che $\xi = \xi(\omega)$, $v = j\omega\xi(\omega)$ e $a = (j\omega)(j\omega)\xi(\omega) = -\omega^2\xi(\omega)$.

Prima di applicare la TdF all'equazione completa consideriamo nello specifico la componente radiativa espressa da $F_{rad} = f_i \cdot a$. Poniamo in un primo momento questa nel dominio delle frequenze:

$$F_{rad}(\omega) = f_i(\omega) \cdot (-\omega^2)\xi(\omega) \quad (2.10)$$

Si osserva allora che il termine $f_i(\omega)$ può essere scomposto in parte reale ed immaginaria, tale per cui :

$$f_i(\omega) = A(\omega) - jb(\omega) \quad (2.11)$$

Si può allora riscrivere F_{rad} e svilupparne il suo contenuto:

$$\begin{aligned} F_{rad}(\omega) &= -\omega^2(A(\omega) - jb(\omega)) \cdot \xi(\omega) \\ &= -\omega^2 \cdot A(\omega)\xi(\omega) + j\omega^2 \cdot b(\omega)\xi(\omega) \\ &= (j\omega)(j\omega)A(\omega)\xi(\omega) - j(j\omega)(j\omega)b(\omega)\xi(\omega) \\ &= A(\omega)\ddot{\xi}(\omega) + \omega \cdot b(\omega)\dot{\xi}(\omega) \\ &= A(\omega)\ddot{\xi}(\omega) + B(\omega)\dot{\xi}(\omega) \\ &= [-\omega^2A(\omega) + jB(\omega)]\xi(\omega) \end{aligned}$$

In tale procedimento sono stati definiti due nuovi termini. $\mathbf{A}(\omega)$ rappresenta la **Massa Aggiunta**, relazionata all'accelerazione del corpo in moto. $\mathbf{B}(\omega)$ invece è relazionata alla velocità e rappresenta il coefficiente di smorzamento radiativo, detto anche **Damping Coefficient**. Questi sono fra i principali parametri utilizzati per caratterizzare l'interazione di un corpo immerso in un fluido e saranno parte fondamentale nell'analisi sperimentale effettuata nel presente elaborato.

Definita ora F_{rad} e fatte le opportune analisi, possiamo riscrivere l'Equazione (2.9) effettuando la trasformata di Fourier.

$$\begin{aligned} M \cdot (-\omega^2)\xi(\omega) &= F_{pto}(\omega) - B_V(\omega) \cdot (j\omega)\xi(\omega) - C \cdot Z(\omega) + \\ &\quad -[-\omega^2A(\omega) + jB(\omega)]\xi(\omega) + F_{ex}(\omega) \end{aligned}$$

Raccogliendo i termini simili si ottiene:

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = [-\omega^2(M + A(\omega)) + C + j\omega(B(\omega) + B_V(\omega))]\xi(\omega) \quad (2.12)$$

La stessa equazione, con delle semplici trasformazioni, può inoltre essere definita in funzione della velocità verticale $\dot{\xi}(\omega)$ ottenendo l'**Equazione di Moto per singolo grado di libertà nel dominio della frequenza**:

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = \left[(B(\omega) + B_V(\omega)) + j \left(\omega(M + A(\omega)) + \frac{C}{\omega} \right) \right] \dot{\xi}(\omega)$$

La parte fra parentesi quadre è definita come **Impedenza di boa** Z_{buoy}

$$Z_{buoy} = (B(\omega) + B_V(\omega)) + j \left(\omega(M + A(\omega)) + \frac{C}{\omega} \right) \quad (2.13)$$

la quale verrà poi determinata sperimentalmente e risulta parametro essenziale per definire la dinamica del sistema onda-galleggiante. L'Equazione di Moto può allora essere scritta sinteticamente come:

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = Z_{buoy} \cdot \dot{\xi}(\omega) \quad (2.14)$$

2.1.2 Equazione di Moto nel dominio del tempo a 1 DOF

Dopo aver definito l'Equazione di Moto nel dominio delle frequenze risulta interessante e utile per le successive analisi andare a rappresentare la stessa equazione nel dominio del tempo. Ripartiamo allora dall'Equazione (2.12), andando ad esplicitare le componenti derivate di velocità e accelerazione.

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = [M + A(\omega)]\ddot{\xi}(\omega) + C \cdot \xi(\omega) + [B(\omega) + B_V(\omega)]\dot{\xi}(\omega) \quad (2.15)$$

Analizziamo in maniera più specifica il termine $A(\omega)$ rappresentante la Massa Aggiunta, aggiungendo e togliendo un fattore A_∞ il quale indica il valore della stessa massa aggiunta per frequenze che tendono ad infinito.

$$\begin{aligned} A(\omega)\ddot{\xi}(\omega) &= (A_\infty + A(\omega) - A_\infty)\ddot{\xi}(\omega) \\ &= A_\infty \cdot \ddot{\xi}(\omega) + (A(\omega) - A_\infty)j\omega\dot{\xi}(\omega) \end{aligned}$$

Possiamo allora scrivere quanto ottenuto all'interno dell'Equazione (2.15):

$$\begin{aligned}
F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) &= [M + A_\infty]\ddot{\xi}(\omega) + C \cdot \xi(\omega) + \\
&+ [B(\omega) + B_V(\omega) + j\omega(A(\omega) - A_\infty)]\dot{\xi}(\omega) \\
&= [M + A_\infty]\ddot{\xi}(\omega) + C \cdot \xi(\omega) + K_{rad}(\omega)\dot{\xi}(\omega)
\end{aligned}$$

dove $\mathbf{K}_{rad}(\omega) = [B(\omega) + B_V(\omega) + j\omega(A(\omega) - A_\infty)]$ rappresenta la **Risposta Impulsiva Radiativa** in frequenza, anch'esso parametro essenziale per la definizione dei coefficienti idrodinamici del galleggiante.

Prima del successivo passaggio è necessario enunciare il teorema di convoluzione [3]. Tale teorema afferma che il prodotto della trasformata di Fourier di due funzioni corrisponde alla loro convoluzione. Andando nello specifico, date due funzioni $F(\omega)$ e $G(\omega)$, sia $H(\omega) = F(\omega) \cdot G(\omega)$, se indichiamo con h l'antitrasformata di Fourier di $H(\omega)$, allora

$$h(t) = \int f(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (2.16)$$

ovvero la convoluzione di f con g .

Possiamo applicare tale teorema alla risposta impulsiva radiativa in frequenza, dove consideriamo $K_{rad}(\omega) = F(\omega)$ e $\dot{\xi}(\omega) = G(\omega)$. Attraverso il teorema della convoluzione ci riportiamo nel dominio del tempo:

$$k_{rad}(t) = \int_{-\infty}^{\infty} K_{rad}(\tau) \cdot \dot{\xi}(t - \tau) d\tau \quad (2.17)$$

il quale è definito anche come Memory Effect (risposta impulsiva radiativa nel dominio del tempo).

Lo stesso ragionamento fatto per la componente radiativa può essere fatto per la forza di eccitazione F_{ex} , definendola nel dominio del tempo come

$$f_{ex}(t) = - \int_{-\infty}^{\infty} k_{ex}(\tau) \cdot \eta(t - \tau) d\tau \quad (2.18)$$

dove η rappresenta l'elevazione d'onda.

Infine, è possibile scrivere l'**Equazione di Moto per singolo grado di libertà nel dominio del tempo**, detta anche **Equazione di Cummins**:

$$\begin{aligned}
F_{pto} - \int_{-\infty}^{\infty} k_{ex}(\tau) \cdot \eta(t - \tau) d\tau &= [M + A_\infty]\ddot{\xi}(t) + B_V\dot{\xi}(t) + C \cdot \xi(t) \\
&+ \int_{-\infty}^{\infty} K_{rad}(\tau) \cdot \dot{\xi}(t - \tau) d\tau
\end{aligned}$$

2.1.3 Equazione di Moto nel dominio della frequenza a 2 DOF

Per ogni corpo rigido tridimensionale libero di muoversi nello spazio è possibile distinguere 6 gradi di libertà. I primi tre vanno a determinare in maniera univoca la posizione e il movimento di traslazione lungo gli assi del sistema di riferimento (x,y,z) . Gli altri tre vanno invece a descrivere l'orientamento e il movimento di rotazione del corpo rigido. Per descrivere gli ultimi tre sono tipicamente utilizzati gli angoli di Eulero: angolo di yaw (imbardata), angolo di pitch (beccheggio) e angolo di roll (rollio). È possibile osservare una rappresentazione dei 6 gradi di libertà per un corpo rigido in Figura 2.1.

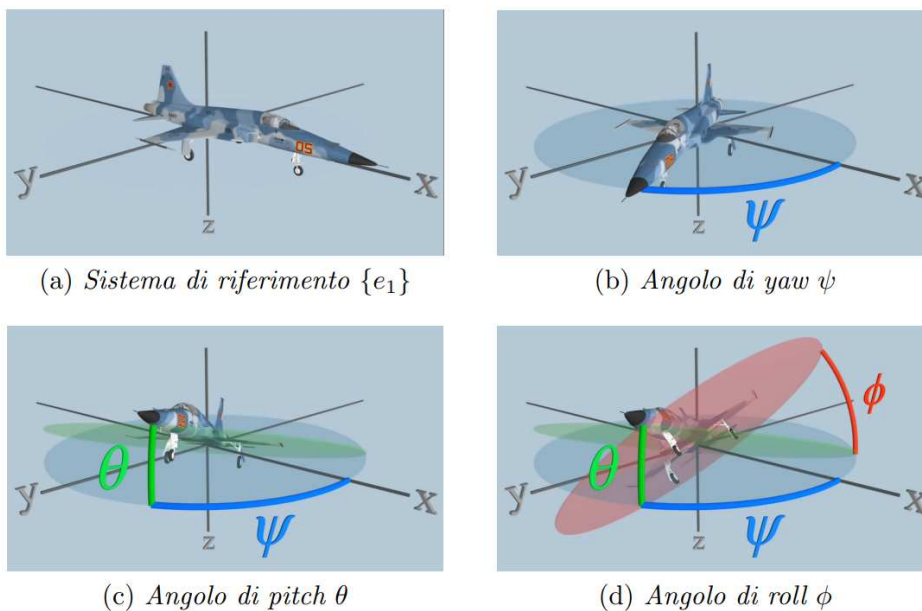


Figura 2.1: Definizione dei 6 DOF di un corpo rigido

Nel sistema in analisi si ha un funzionamento a 2 gradi di libertà. Per quanto riguarda le proprietà traslazionali la presenza del vincolo comporta l'impossibilità di movimento nel piano $x-y$, con solo movimento verticale (detto di heave). Per gli altri 3 DOF si ha come unica rotazione possibile quella attorno all'asse delle y , quindi di roll, considerando le onde incidenti dalla direzione dell'asse x . Per fornire una descrizione coerente del sistema risulta allora necessario andare a definire l'Equazione di Moto per due gradi di libertà: elevazione sull'asse ξ (corrispondete al classico asse z del sistema cartesiano) e rotazione attorno all'asse y . Svilupperemo tali analisi nel dominio delle frequenze, poi prevalentemente applicato per l'analisi sperimentale.

Riscriviamo l'Equazione di Moto a 1 DOF nel dominio delle frequenze prima definita:

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = \left[(B(\omega) + B_V(\omega)) + j \left(\omega(M + A(\omega)) + \frac{C}{\omega} \right) \right] \dot{\xi}(\omega) \quad (2.19)$$

I termini, precedentemente descritti per solo movimento verticale sull'asse ξ , devono ora includere una rotazione. Indicheremo allora con M i momenti e con $\dot{\varphi}$ le velocità di rotazione. Riscrivendo così l'equazione otteniamo:

$$\begin{bmatrix} F_{pto}(\omega) \\ M_{pto}(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{ex}(\omega) \\ M_{ex}(\omega) \end{bmatrix} = \left[(B(\omega) + B_V(\omega)) + j \left(\omega(M + A(\omega)) + \frac{C}{\omega} \right) \right] \begin{bmatrix} \dot{\xi}(\omega) \\ \dot{\varphi}(\omega) \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Bisogna poi considerare che i fattori $A(\omega)$, $B(\omega)$ e $B_V(\omega)$ ricavabili per mezzo di prove sperimentali ora rappresentano nelle matrici 2×2 . In particolare si avrà il primo termine diagonale indicante le condizioni di heave (spostamento sull'asse ξ), il secondo termine diagonale per il pitch (rotazione sull'asse y). Infine gli ultimi due rappresentano i termini misti.

Risulta poi necessario andare ad indagare la natura nelle matrici di massa M e di galleggiamento C . La matrice M può essere definita come:

$$M = \begin{bmatrix} m & mf \\ mf & I_0 + m(\frac{B}{2})^2 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

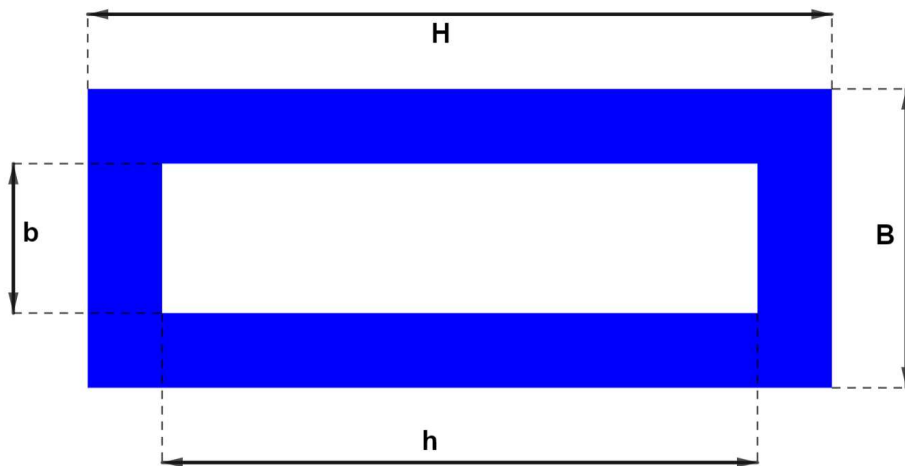


Figura 2.2: Rappresentazione schematica del galleggiante

CAPITOLO 2. PREMESSE TEORICHE E ANALISI NUMERICA DEI
COEFFICIENTI IDRODINAMICI

dove m indica la massa del galleggiante immersa all'equilibrio, f indica la distanza fra il centro di massa del galleggiante e il pelo libero d'acqua in condizioni di equilibrio idrostatico, B indica larghezza longitudinale del WA. Infine, sia s l'altezza di galleggiante al di sotto del livello dell'acqua, e considerate le quote rappresentate in Figura 2.2, I_0 può essere definito come differenza del momento d'inerzia rotativo del parallelepipedo esterno e di quello interno vuoto:

$$I_0 = \rho \left[B H s \left(\frac{B^2 + s^2}{12} \right) - b h s \left(\frac{b^2 + s^2}{12} \right) \right] \quad (2.22)$$

La matrice C può essere definita come:

$$C = \begin{bmatrix} C_z & 0 \\ 0 & C_\varphi \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

Si ha allora il primo termine diagonale definito come $C_z = mA$ dove A indica l'area superficiale del galleggiante. Il secondo termine diagonale è dato invece da $C_\varphi = mI_{sup}$, dove a sua volta I_{sup} rappresenta il momento d'inerzia superficiale ed è definito come:

$$I_{sup} = \frac{H \cdot B^3}{12} - \frac{h \cdot b^3}{12} \quad (2.24)$$

È possibile quindi riscrivere nella forma completa l'**Equazione di Moto a 2 DOF nel dominio delle frequenze**:

$$\begin{bmatrix} F_{pto}(\omega) \\ M_{pto}(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F_{ex}(\omega) \\ M_{ex}(\omega) \end{bmatrix} = \left[\left(B(\omega) + B_V(\omega) \right) + j \left(\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} C_z & 0 \\ 0 & C_\varphi \end{bmatrix} + \omega \left(\begin{bmatrix} m & mf \\ mf & I_0 + mb^2 \end{bmatrix} + A(\omega) \right) \right) \right] \begin{bmatrix} \dot{\xi}(\omega) \\ \dot{\varphi}(\omega) \end{bmatrix}$$

2.2 Determinazione numerica dei coefficienti idrodinamici

Primo obiettivo del presente elaborato è definire attraverso analisi sperimentale i coefficienti idrodinamici del sistema. Prima delle prove in laboratorio sono stati ottenuti tali coefficienti attraverso analisi numerica. Verrà allora definito il metodo utilizzato e quindi i risultati a titolo di confronto. Per

analisi numeriche è possibile utilizzare diversi programmi dedicati dei quali citiamo NEMOH, HAMS, Capytaine, WAMIT e il modulo AQWA di ANSYS. Nel nostro caso è stato principalmente utilizzato NEMOH, in maniera combinata con Matlab per analisi di post-processing.

2.2.1 Boundary Element Method

Nella fase preliminare della progettazione risulta essenziale simulare numericamente le prestazioni di un WEC. Risulta infatti molto meno oneroso a livello di costi, non dovendo disporre di un canale di prova e dello stesso prototipo, oltre a ridurre in maniera sostanziale i tempi di analisi. A tale scopo il metodo più utilizzato è il Boundary Element Method (BEM) il quale permette di definire in maniera rapida i coefficienti idrodinamici da porre poi all'interno dell'Equazione di Moto. Nonostante sia necessario utilizzare delle ipotesi semplificative, motivo per cui è poi necessaria una validazione sperimentale, presenta un costo computazionale di molto inferiore rispetto ad altri metodi numerici simulativi più dettagliati come la Computational Fluid Dynamics (CFD) o la Smooth Particle Hydrodynamics (SPH). Il BEM è un metodo numerico per la risoluzione di equazioni differenziali alle derivate parziali lineari formulate nella loro forma integrale, definito in maniera molto simile al Finite Element Method (FEM) nei suoi step. È infatti necessario, dopo aver definito la struttura 3D dell'oggetto, dividere la regione di spazio da analizzare in domini di grandezze inferiori e di più facile analisi, creando quindi la mesh. A partire da questa per ognuno dei domini creati si andranno a definire delle equazioni più semplici le quali, unite fra di loro, vanno a creare un unico sistema con minor costo computazionale.

I principali vantaggi del metodo BEM sono i seguenti:

- deve essere discretizzato solo il bordo dell'oggetto 3D, diversamente dall'analisi FEM nel quale a meno di particolari simmetrie bisognerebbe operare con elementi tridimensionali;
- la soluzione all'interno del dominio complessivo viene calcolata solo dove risulta necessario, riducendo quindi la complessità del problema.

Si hanno poi però degli svantaggi:

- le matrici che si vanno a creare sono dense, causando una crescita quadratica del costo computazionale all'aumentare delle dimensioni;
- i mezzi disomogenei o non lineari sono molto più complessi da analizzare rispetto ad analisi FEM.

La formulazione integrale del problema onda-struttura al fine di ricavare la formulazione stessa del metodo BEM risulta molto complessa e si rimanda a [9] per una più completa trattazione. Descriveremo a seguire i principali accorgimenti necessari per andare a definire in maniera univoca gli input utilizzati a livello pratico per effettuare la risoluzione [20].

2.2.2 Definizione numerica dei coefficienti idrodinamici attraverso analisi NEMOH

NEMOH è un software open source sviluppato dai ricercatori dell'*Ecole Centrale de Nantes* rilasciato nel 2014. Tale programma implementa un codice BEM dedicato al calcolo delle forze e dei coefficienti idrodinamici per tutti e sei i gradi di libertà della struttura in analisi [14]. Per effettuare una simulazione è necessario in un primo momento disegnare tramite software CAD 3D la struttura del WEC, nel nostro caso è stato utilizzato Fusion 360 con struttura rappresentata in Figura 2.3 a sinistra. Al fine di garantire il giusto sistema di riferimento bisogna imporre l'origine degli assi nel baricentro dell'area individuata dall'intersezione del piano corrispondente al medio mare e il corpo in condizioni di equilibrio idrostatico. Risulta poi essenziale definire il sistema di misura in metri al fine di evitare incompatibilità con NEMOH o risultati non coerenti. La rappresentazione 3D dovrà inoltre avere un'altezza pari alla sola componente di WEC immersa in mare in condizioni idrostatiche. Le caratteristiche geometriche e di massa del galleggiante in queste condizioni sono riportate in Tabella 2.1 [9].

Come ultima osservazione per il disegno 3D risulta necessario "scoperchiare" il WEC, ovvero rimuovere la superficie superiore. Tale accorgimento viene effettuato perchè tale superficie risulta in superficie all'acqua. Non abbiamo interesse a definire delle boundary condition e di conseguenza un cam-

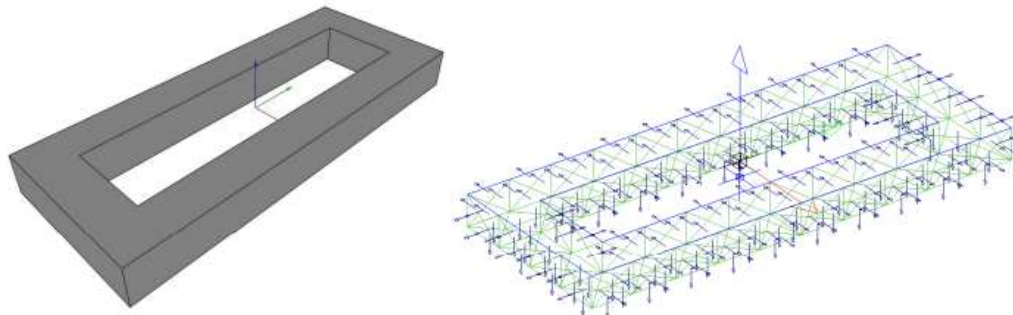


Figura 2.3: Geometria e Mesh del galleggiante in analisi

Proprietà	Simbolo	Valore	Unità di misura
Volume	V	0.024	$[m^3]$
Superficie esterna	S_{ext}	0.96	$[m^2]$
Densità	ρ_b	0.7	$[kg/m^3]$
Massa	m	16.8	$[kg]$
Baricentro	\vec{r}_G	(0,0,-0.02)	$[m]$
Momenti di inerzia diagonali	(I_{xx}, I_{yy}, I_{zz})	(1.75,0.35,2.072)	$[kg\ m^2]$
Prodotti di inerzia	(I_{xy}, I_{xz}, I_{yz})	(0,0,0)	$[kg\ m^2]$
Centro di galleggiamento	\vec{r}_B	(0,0,-0.035)	$[m]$
Waterplane area	A_b	0.24	$[m^2]$
Volume immerso	V_{imm}	0.0168	$[m^3]$

Tabella 2.1: Proprietà geometriche e di massa del galleggiante

po di pressioni. In questo modo si va a ridurre la complessità computazionale complessiva.

Completato il disegno 3D è possibile creare la mesh della struttura, triangolare nel nostro caso, potendo definire le dimensioni massime degli elementi (più piccoli sono gli elementi maggiore risulta la complessità computazionale). Il file di mesh può allora essere estratto in formato .stl.

Risulta poi necessario convertire il file .stl in uno del tipo .dat. A tal fine viene utilizzato il programma BEMRosetta. Come si osserva in Figura 2.3 a destra, presa appunto direttamente da BEMRosetta, nella superficie superiore non sono presenti i vettori normali. Questo è dovuto a quanto spiegato prima, cioè al fatto che al WEC è stata tolta la superficie superiore e di conseguenza non verrà considerata come parte del dominio di analisi.

Come ultimo step prima di utilizzare NEMOH bisogna creare una cartella ad hoc con all'interno una sottocartella per i risultati, una per i file .dat della mesh e infine un file nemoh.cal nel quale vengono definite le specifiche di analisi. In particolare si va a specificare il numero di corpi, i gradi di libertà, la profondità della vasca, il range di frequenze in interesse e gli output di cui si vuole disporre in seguito alla simulazione. Nel file in questione si va inoltre a definire quale sia il centro di rotazione, da noi imposto all'estremo sinistro del galleggiante dove si ha il vincolo nel caso reale. Alternativa a questa procedura consiste nel definire il riferimento degli assi all'estremità del galleggiante durante la creazione del file CAD 3D, per poi non modificare il centro di rotazione da nemoh.cal. Si otterranno i medesimi risultati.

Dopo i passaggi descritti è possibile utilizzare NEMOH. Questo, a differenza di altri software di calcolo, non dispone di un'interfaccia utente, rendendo poco intuitivo il suo utilizzo.

CAPITOLO 2. PREMESSE TEORICHE E ANALISI NUMERICA DEI COEFFICIENTI IDRODINAMICI

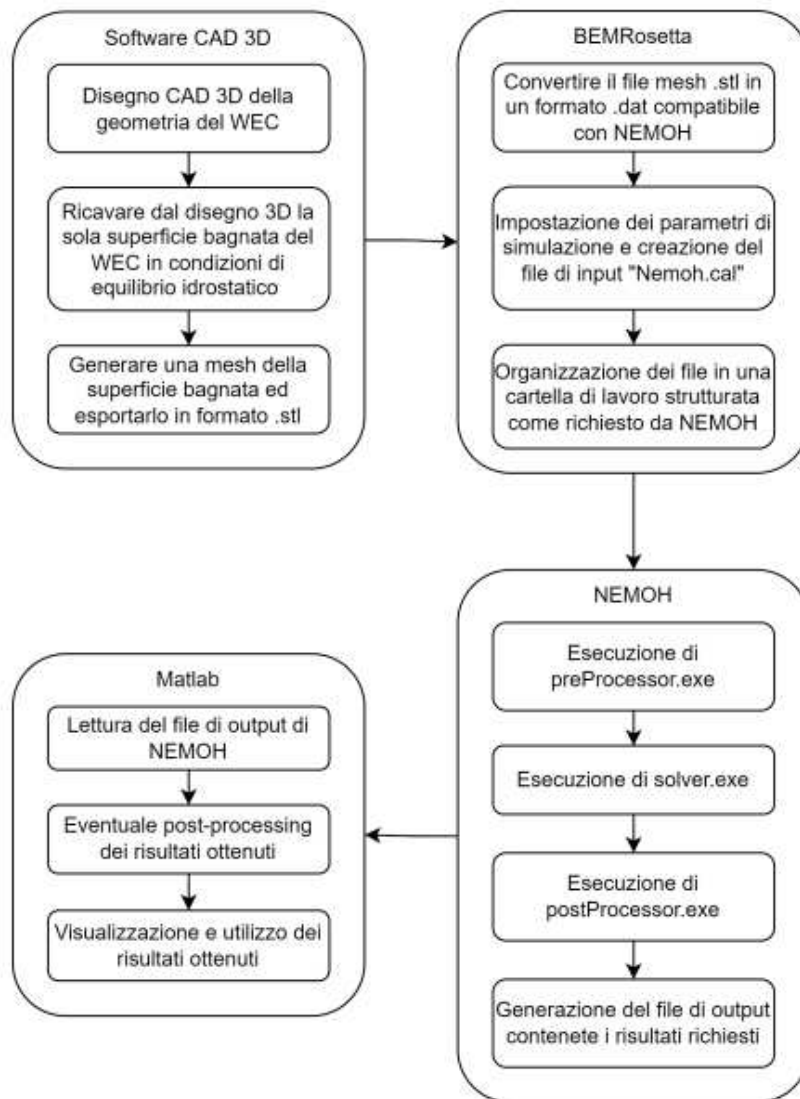


Figura 2.4: Flow chart riassuntiva per ottenere le grandezze idrodinamiche di una data geometria di WEC utilizzando NEMOH

Il software consiste in 3 file da eseguire in sequenza, dove ciascuno dà dei risultati diversi da analizzare poi successivamente tramite post-processing su Matlab (o direttamente da BEMRosetta per determinati coefficienti idrodinamici). Si osserva poi che, nel caso in cui ci sia necessità di limitare ad un numero inferiore a 6 i gradi di libertà, risulta necessario avviare i diversi file di NEMOH direttamente dal prompt del computer. Descriviamo in maniera riassuntiva cosa vadano a effettuare i diversi file:

-
- *"preProcessor.exe"*. I file di input creati dall'utente vengono letti dall'applicazione e i dati relativi alla mesh vengono preparati per la simulazione. Gli input includono valori ambientali, come densità dell'acqua di mare, profondità del fondo marino, frequenza e direzione delle onde, informazioni relative al problema specifico come il numero di corpi e gradi di libertà da analizzare e il numero di pannelli e nodi di cui è composta la mesh.
 - *"solver.exe"*. È la routine che effettua la vera e propria soluzione del sistema. Vengono risolti i problemi di diffrazione e radiazione per ogni frequenza fornita come input e dalle soluzioni dei flussi a potenziale viene calcolato il campo di pressione da cui poi vengono calcolati, tramite le definizioni, coefficienti e forze idrodinamiche. Alla fine dell'esecuzione vengono creati dei file di output in cui sono contenute tutte le informazioni ottenute.
 - *"postProcessor.exe"*. I file di output vengono elaborati per ottenere grandezze secondarie come le funzioni di risposta impulsiva di radiazione oppure il campo di elevazione della superficie libera. Alternativamente esistono numerosi strumenti software e routine di terze parti che possono essere utilizzati per post-elaborare i file di output del *"solver.exe"*.

Terminata la routine descritta avremo a disposizione una serie di file .dat non di immediata comprensione. Al fine di osservare al meglio i risultati ottenuti è necessario appoggiarsi a funzioni Matlab dedicate per la lettura stessa dei file, effettuando quindi il post-processing. I vari step sono stati riassunti nella flow-chart in Figura 2.4.

Sono quindi riportati a seguire i risultati ottenuti dalle analisi in post-processing. Si osserva che per ciascuna grandezza si ottengono 4 diversi grafici. Questo è dovuto al fatto che la simulazione è stata effettuata considerando due gradi di libertà, ovvero lo spostamento verticale lungo l'asse ξ (heave indicato con il numero 1) e il rollio attorno all'asse y (pitch indicato con il numero 2). Oltre ai due grafici per ogni grado di libertà si ottengono i termini misti. Sono rappresentati allora in Figura 2.5 e 2.6 rispettivamente i coefficienti di Massa Aggiunta e di Damping Factor ottenuti direttamente dall'analisi NEMOH. Si osserva in tale analisi la presenza di termini misti non nulli: si ha accoppiamento fra movimento verticale del galleggiante e rotazione non avendo centro di rotazione al baricentro. In Figura 2.7 e 2.8 si hanno le funzioni di risposta impulsiva di radiazione e di eccitazione ottenute tramite post-processing su Matlab. Queste rappresentano la risposta del

galleggiante derivante da un impulso nella velocità, ovvero un gradino nella posizione di durata molto ridotta, analizzata nel dominio del tempo. Possono essere definite sperimentalmente dando un impulso esterno sul galleggiante (un colpo con un bastone per esempio) e analizzando il comportamento della forza al passare del tempo. In Figura 2.9 si ha invece la funzione di eccitazione in frequenza calcolata da NEMOH, la quale va a definire quale sia la forza e il momento di eccitazione agente sul galleggiante per una certa altezza d'onda H ad un ω specifica.

2.2.3 Problematica del "moon pool"

La geometria della boa in analisi è caratterizzata dalla presenza di un "moon pool" nella zona centrale, ovvero un'apertura nel galleggiante che consente un accesso all'acqua all'interno. A causa di questa apertura si rivelano delle problematiche a livello numerico: nell'analisi del potenziale di flusso si vanno a generare delle soluzioni in termini di elevazione della superficie libera dell'acqua maggiorate a causa di fenomeni di risonanza interna. D'altra parte nel caso pratico queste risonanze sono di gran lunga meno evidenti in quanto vanno ad essere smorzate da attriti viscosi interni non considerati dal software numerico. Ne deriva l'ottenimento di coefficienti idrodinamici non coerenti (massa aggiunta negativa ad esempio), in particolare alle frequenze di risonanza, causando un movimento non realistico della boa andando poi a simulare a livello numerico l'Equazione di Moto.

Soluzione al problema del "moon pool" consiste nell'andare a creare un secondo oggetto, complementare al primo, il quale andrà ad occupare il buco nel galleggiante. Sarà allora necessario effettuare una simulazione a due corpi, quindi con una maggior complessità computazionale, evitando però i fenomeni di risonanza interna.

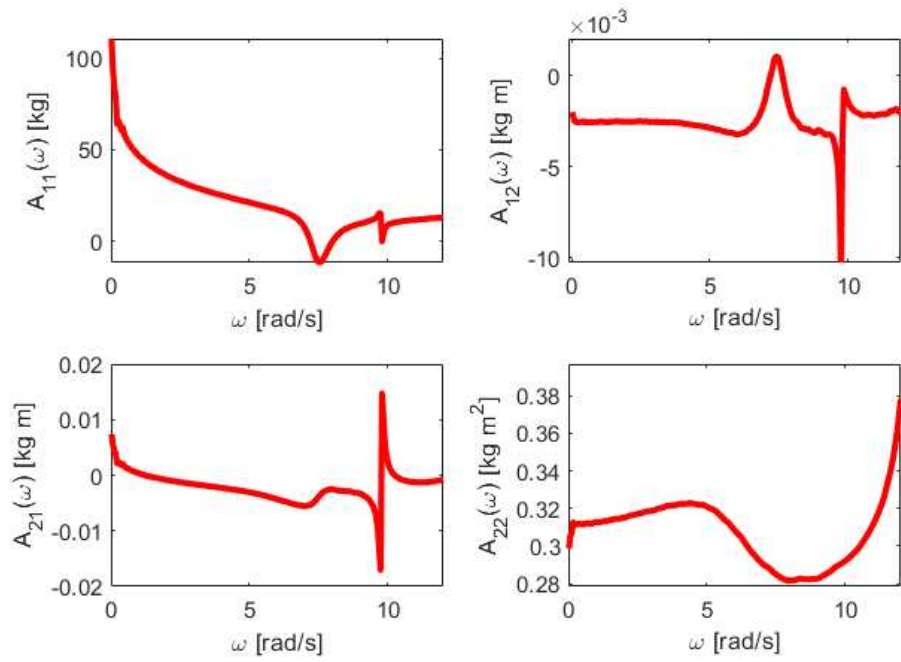


Figura 2.5: Coefficienti di massa aggiunta calcolati da NEMOH

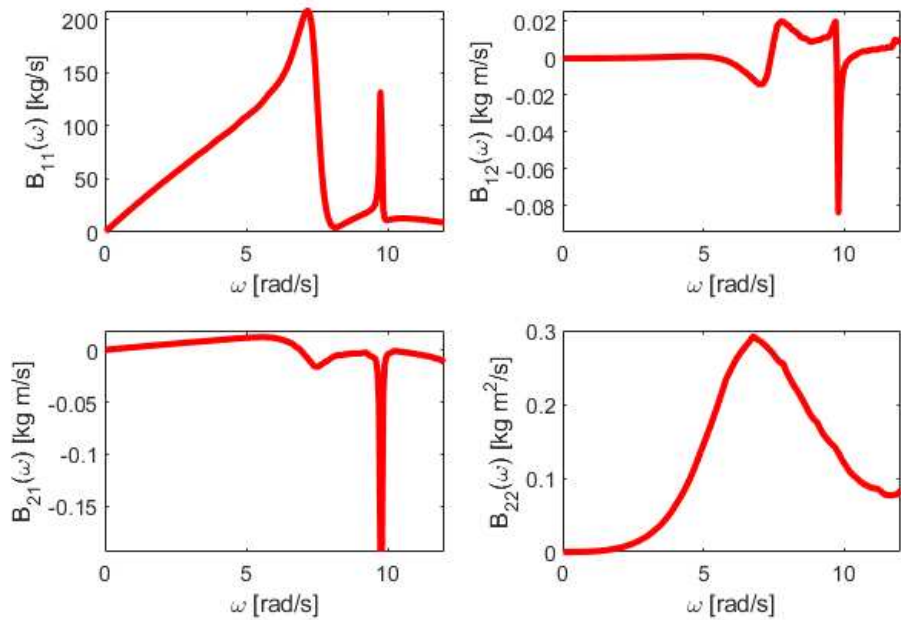


Figura 2.6: Coefficienti di smorzamento radiativo (damping factor) calcolati da NEMOH

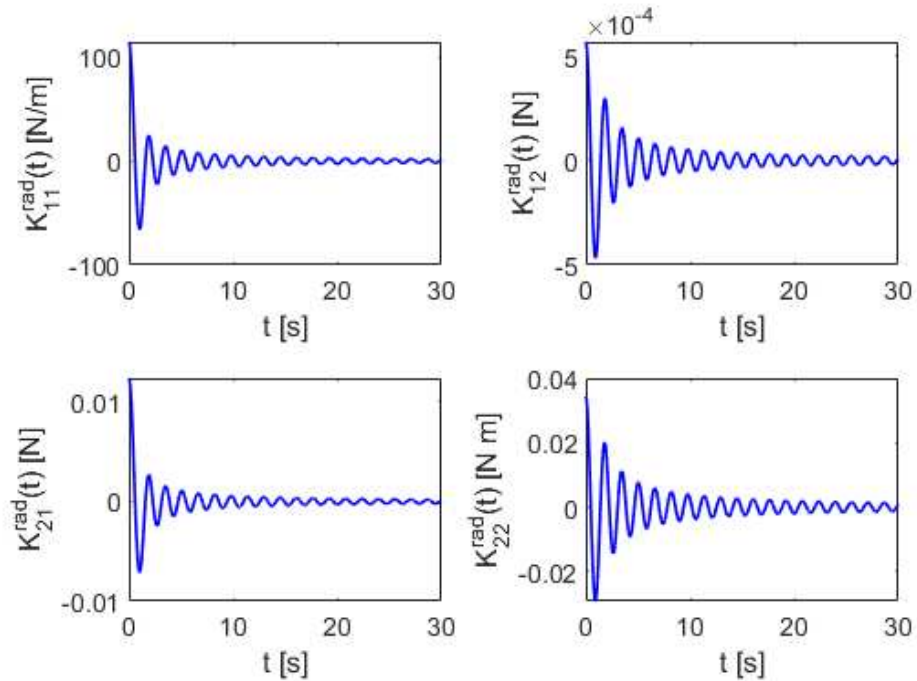


Figura 2.7: Funzioni di risposta impulsiva di radiazione ottenute tramite post-processing con procedure Matlab

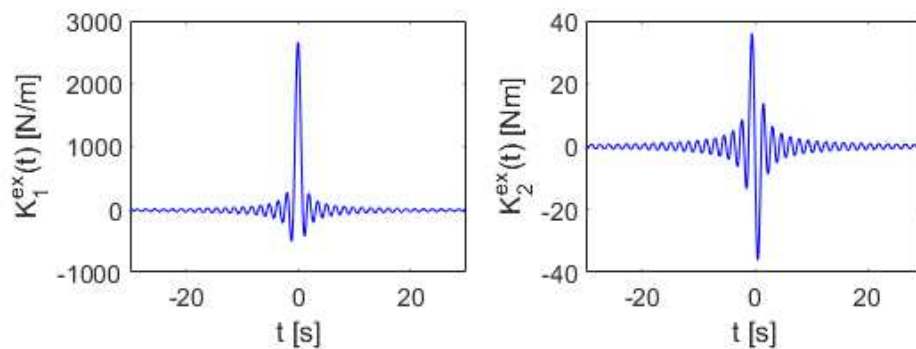


Figura 2.8: Funzioni di risposta impulsiva di eccitazione ottenute tramite post-processing con procedure Matlab

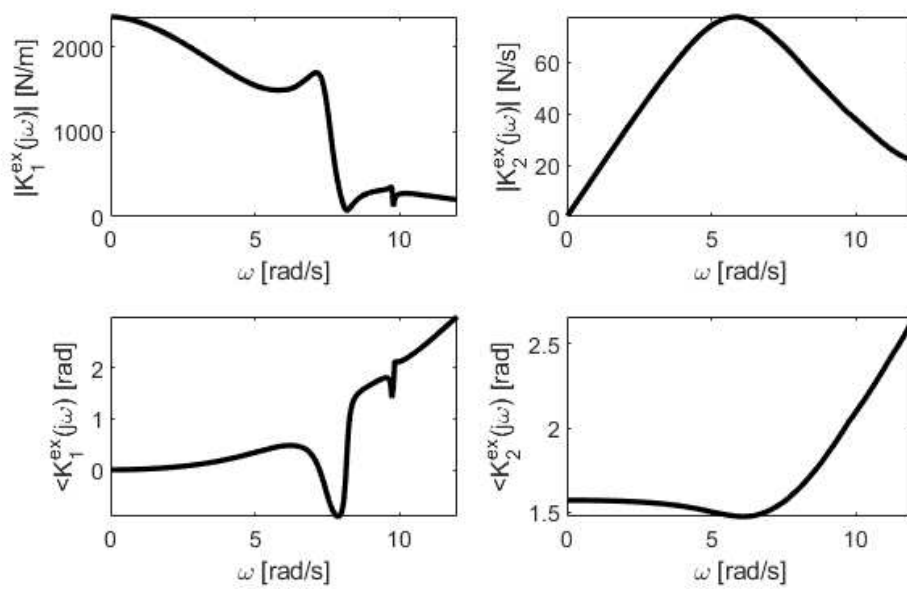


Figura 2.9: Funzione di eccitazione in frequenza calcolata da NEMOH

Capitolo 3

Validazione sperimentale

Si ha ora interesse a illustrare il sistema sperimentale e le metodologie di analisi applicate durante le prove in vasca sul WA, alla fine di caratterizzare a livello idrodinamico a 2 gradi di libertà il dispositivo, andando a validare i risultati numerici ottenuti con analisi NEMOH.

Verrà descritto il modello sperimentale utilizzato, dal canale di prova e la configurazione meccanica all'azionamento elettrico e il sistema di controllo. Andranno poi descritte a livello teorico le prove sperimentali effettuate al fine di caratterizzare il WA. Verranno riportati quindi i risultati sperimentali della Prova di Radiazione e della Prova di Risposta Impulsiva, quindi le analisi in post-processing necessarie per di ottenere i coefficienti idrodinamici. Come ultimo aspetto verrà implementato un modello Simulink per simulare il movimento a 2 DOF del galleggiante in funzione del tempo, confrontando i risultati ottenuti con quelli derivanti dalla prova sperimentale a Corpo Libero.

3.1 Descrizione dell'apparato sperimentale

Verrà presentato a seguire l'apparato sperimentale utilizzato per le analisi effettuate presso il laboratorio GEOMAR dell'Università di Padova. Verrà quindi descritto il canale di prova, per poi definire il sistema di misura, quindi il funzionamento del programma Sysmac Studio utilizzato per l'azionamento elettrico dell'attuatore.

3.1.1 Canale di prova

Il canale di prova consiste in una vasca lunga 35 metri, larga 1 metro e alta 1,3 metri. In una delle due estremità è installata una pala idraulica di dimensioni 1,0 m x 1,4 m che funge da generatore d'onde fisso. Quest'ultimo è dotato di



Figura 3.1: Fotografia della struttura esterna del canale di prova

servo-valvola e di trasduttore di posizione collegato al sistema di generazione, tale da permettere di generare onde regolari ed irregolari in base al comando spettrale conferito. La pala idraulica ha la possibilità di effettuare movimento traslazionale (“a pistone”), oppure essere incernierata al fondale. Nelle prove effettuate in sede di analisi è stato applicato un metodo traslazionale per la generazione del moto ondoso.

Il canale di prova presso la sede Geomar è presente già dal 1954, è stato però completamente rinnovato nel 2002. È stata allora modificata la struttura in cemento con una in metallo, utilizzando delle travi in acciaio con sezione a U e la possibilità, attraverso una coppia di rotaie poste sulle stesse travi, di muovere un carrello lungo tutta la lunghezza della vasca. È possibile osservare tale struttura in Figura 3.1. Tale accorgimento permette di avere una forte semplificazione nelle fasi di manutenzione, permettendo di regolare le sonde prima della fase sperimentale, poste sia prima che dopo il galleggiante (vedi Figura 3.2) e agire direttamente su opportuni malfunzionamenti.

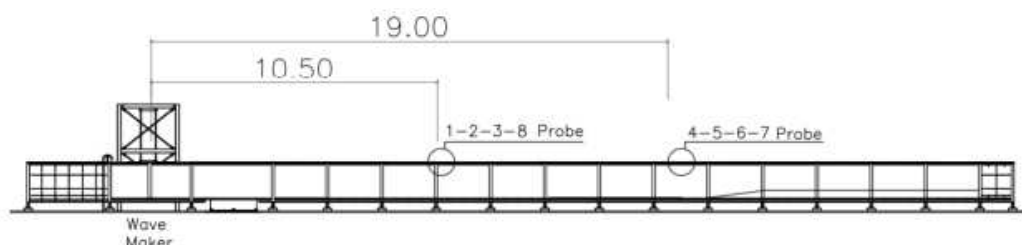


Figura 3.2: Schema del canale ad onde e posizionamento delle sonde resistive

I lati della canaletta sono stati costruiti in vetro di modo da garantire un miglior controllo in fase sperimentale. Infine, per evitare di incorrere in fenomeni di riflessione del moto quando l'onda si sposta verso la fine del canale, è presente un sistema di ricircolo dell'acqua con una pompa in grado di scaricare fino a $100 \text{ m}^3/h$.

3.1.2 Configurazione meccanica e strumenti di misura

Analizziamo ora la configurazione meccanica utilizzata per le prove sperimentali (vedi Figura 3.3). Il prototipo del galleggiante è creato in scala 1:20, è incernierato a due pali di ancoraggio all'estremità più larga nella direzione di arrivo dell'onda incidente. Sono stati ricreati gli anelli di fissaggio andando a ridurre al minimo il giogo: mentre in precedenza si presentavano forti battimenti durante le prove, ora si ha movimento verticale con una riduzione sostanziale degli attriti. Il Power Take Off consiste in un servomotore della OMRON il cui albero è collegato meccanicamente ad un attuatore lineare

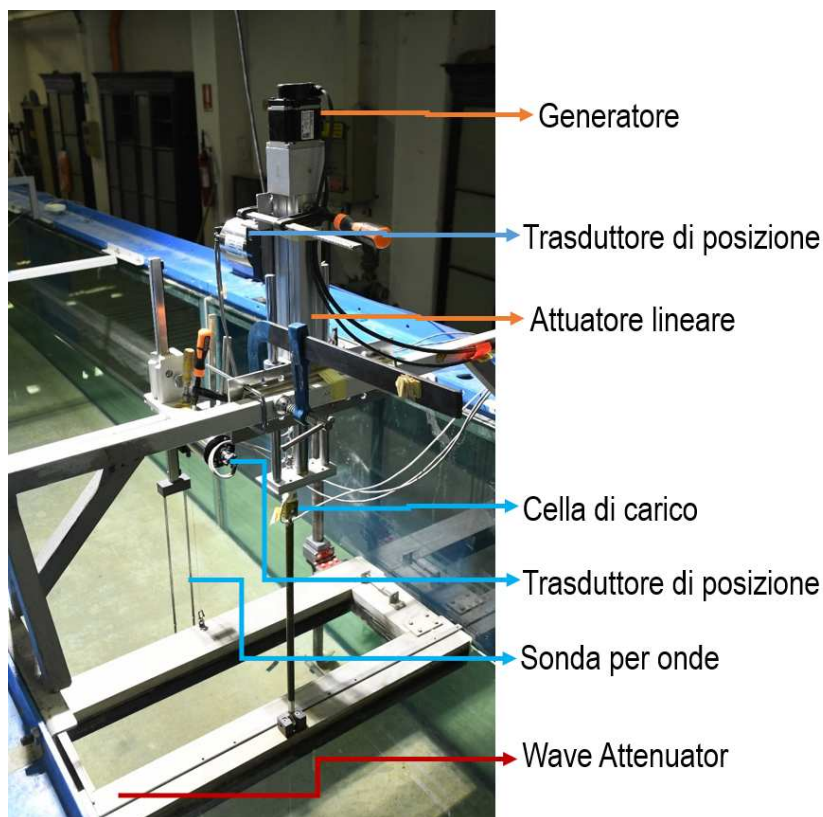


Figura 3.3: Configurazione meccanica del sistema di PTO

a ricircolo di sfere, permettendo quindi di convertire il moto da rotativo a lineare. Alla sua estremità presenta un'asta che va poi ad essere ancorata ad un'estremità del galleggiante.

Si hanno poi i diversi strumenti di misura. Si ha una cella di carico in serie all'asta di collegamento, due trasduttori di posizione in corrispondenza delle due estremità del WA, infine delle sonde di posizione poste a distanza dal galleggiante in entrambe le direzioni (Figura 3.4 a destra). È stato poi creato un sistema di raccolta dati sincronizzato attraverso un trigger, aspetto molto utile per le analisi successive.

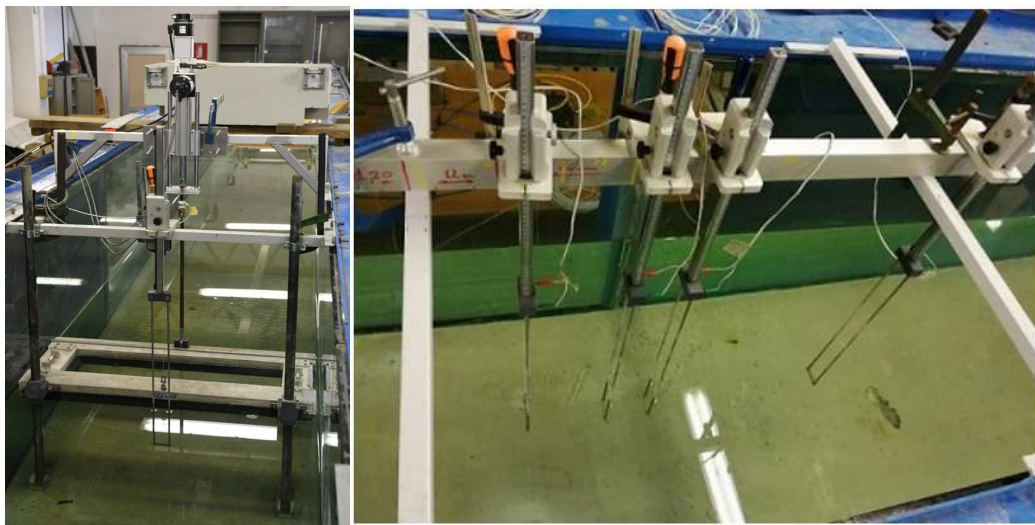


Figura 3.4: Set-up sperimentale installato nel canale

Infine è necessario osservare che, diversamente da quanto rappresentato nel Capitolo precedente, l'asta mobile non è ancorata al fondale ma si trova al di fuori dell'acqua, in direzione perpendicolare al galleggiante. Tale decisione è stata presa di modo da semplificare la struttura portante del PTO, la quale non è immersa nel fluido. Future analisi si propongono di effettuare tale analisi a partire dalla struttura descritta nel Capitolo 1.

3.1.3 Azionamento elettrico e sistema di controllo

La parte dell'apparato strumentale relativa alla logica di controllo consiste in un PLC che esegue un codice realizzato tramite l'ambiente di sviluppo integrato (IDE) installato nel PC (Sysmac Studio). Con riferimento alla Figura 3.5 si è evidenziato con (1) l'Explorer multivista (utilizzato per avere accesso e configurare tutti i dispositivi del sistema), la scheda di monitoraggio (per il controllo in tempo reale delle variabili), (3) l'ambiente di programmazione

CAPITOLO 3. VALIDAZIONE SPERIMENTALE

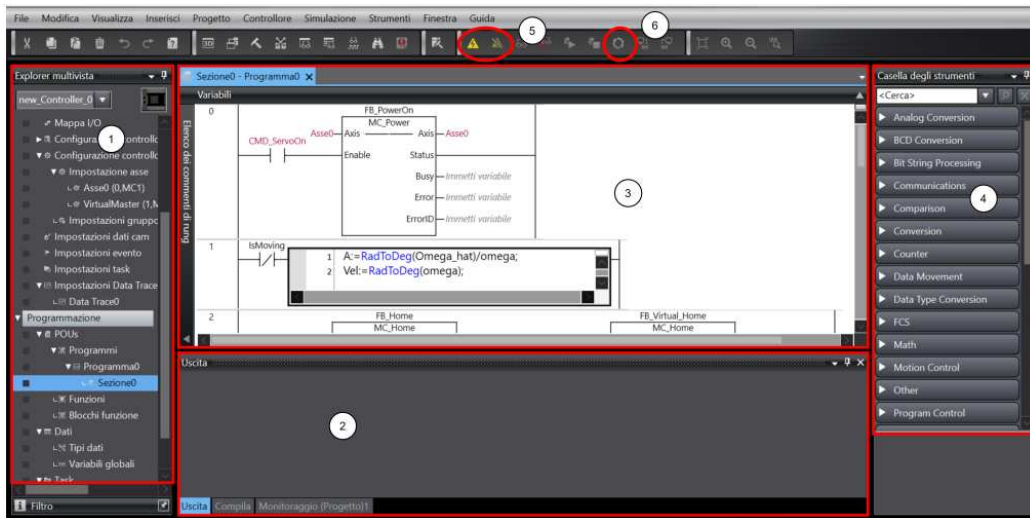


Figura 3.5: Schermata del software Sysmac-Studio

(si utilizzano i linguaggi di programmazione ladder e VB.NET), (4) la casella degli strumenti (in cui sono presenti dei blocchi funzione pre-implementati per l'esecuzione delle procedure più ricorrenti), (5) modalità online e offline (per il controllo via software del PLC), (6) sincronizzazione (per effettuare l'upload del programma) [19].

Il PLC dispone della possibilità di elaborare segnali provenienti dal campo, acquisiti tramite moduli dedicati opzionali inseriti nel PLC oppure direttamente dall'encoder del servomotore.



Figura 3.6: Schema del set-up elettrico

La parte dell'apparato strumentale relativa all'azionamento consiste invece in un inverter che alimenta il servomotore mediante controllo vettoriale della corrente. I circuiti di segnale del PLC e dell'inverter vengono alimentati da una sorgente DC a 24 V, mentre il circuito di potenza dell'azionamento è collegato alla rete elettrica monofase mediante un filtro per attenuare l'effetto dei disturbi provenienti dalla rete elettrica di bassa tensione. L'azionamento è infine collegato al servomotore mediante il cavo trifase di potenza e il cavo di segnale dell'encoder, e ad una resistenza di scarica di 200 Ω per dissipare l'eventuale potenza generata dal sistema. Il servomotore consiste in un motore sincrono a magneti permanenti di coppia e velocità nominale rispettivamente di 0.637 Nm e 3000 rpm.

Le caratteristiche tecniche del motore e del relativo azionamento sono rese disponibili nei relativi cataloghi tecnici [18]. In Figura 3.6 viene riportato uno schema di principio del set-up elettrico realizzato.

In Figura 3.7 è poi possibile la struttura fisica del set-up elettrico installato. Le parti sono state fissate su un compensato per ottenere una maggiore organizzazione. Si nota in basso a destra la presenza di un generatore di tensione utilizzato in sede di prova per alimentare la cella di carico, poi connessa come input al modulo prefissato del PLC.

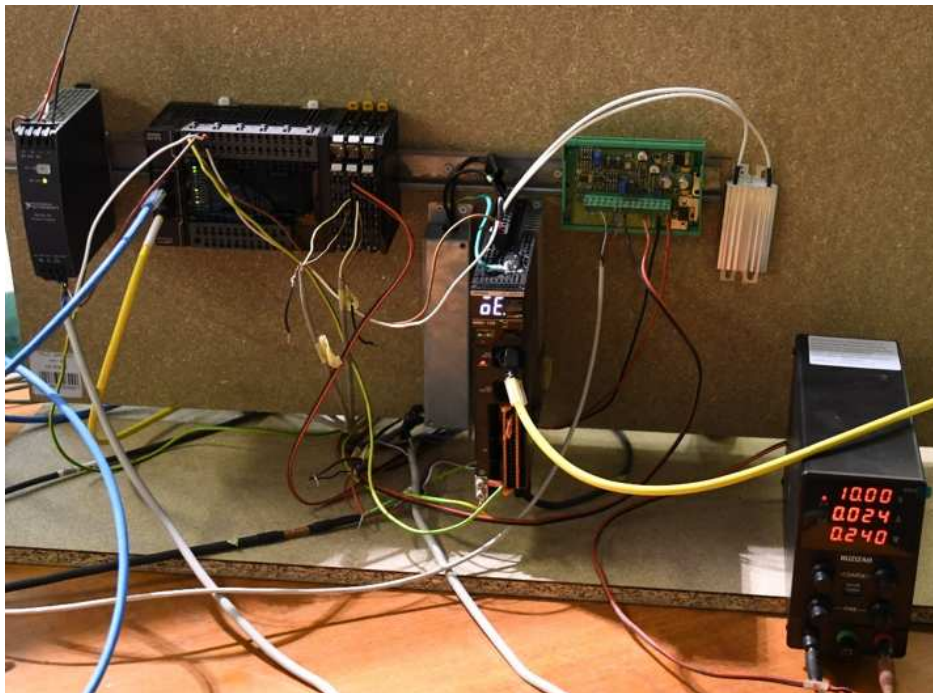


Figura 3.7: Fotografia del set-up elettrico installato

3.2 Analisi teorica delle prove sperimentali

Si prendono ora in considerazione le elaborazioni dei risultati relativi alle prove sperimentali utilizzati per la definizione dei coefficienti idrodinamici del sistema. Si riprende allora l'Equazione di Moto a 2 DOF nel dominio della frequenza definita nel Capitolo 2:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{pto}(\omega) \\ \mathbf{M}_{pto}(\omega) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{ex}(\omega) \\ \mathbf{M}_{ex}(\omega) \end{bmatrix} = \left[\left(B(\omega) + B_V(\omega) \right) + j \left(\frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} C_z & 0 \\ 0 & C_\varphi \end{bmatrix} + \omega \left(\begin{bmatrix} m & mf \\ mf & I_0 + mb^2 \end{bmatrix} + A(\omega) \right) \right) \right] \begin{bmatrix} \dot{\xi}(\omega) \\ \dot{\varphi}(\omega) \end{bmatrix}$$

Al fine di definire i coefficienti idrodinamici si effettuano 3 tipi di prove, ciascuna a diverse condizioni di elevazione d'onda e frequenza. In particolare sono state effettuate:

- **Prova di Radiazione:** nella quale non si ha generazione di onde esterne dal canale di prova, ma il solo azionamento del Power Take Off a muovere il frangiflutti.
- **Prova di Eccitazione:** durante la quale viene imposto un moto ondoso al canale dal generatore di onde, tenendo fermo il galleggiante ad un'estremità con PTO bloccato.
- **Prova a galleggiante libero:** nel quale si ha ancora imposizione di moto ondoso esterno dal generatore d'onde però con galleggiante libero di oscillare nei due gradi di libertà consentitigli dai vincoli..

Analizzeremo le prove una ad una, comprendendo quali coefficienti si possano ricavare da ciascuna analisi.

3.2.1 Prova di Radiazione

Nella Prova di Radiazione non si ha imposizione di moto ondoso da parte del generatore di onde. Di conseguenza ne deriva una forza esterna applicata al galleggiante nulla ($F_{ex} = 0$). Viene invece imposto un movimento, quindi una forza F_{PTO} , sinusoidale all'attuatore. Riprendendo l'Equazione di Moto, con il termine riguardante la forza di eccitazione annullato, si ottiene il primo termine diagonale dell'impedenza di boa \mathbf{Z}_{buoy} prima definita come rapporto fra la forza applicata e la velocità verticale.

$$\mathbf{Z}_{buoy,11} = \frac{F_{pto}(\omega)}{\dot{\xi}(\omega)} = (B_{11}(\omega) + B_{V11}(\omega)) + j\left(\omega(M_{11} + A_{11}(\omega)) + \frac{C_{11}}{\omega}\right) \quad (3.1)$$

Si può ora distinguere l'impedenza di boa in una componente reale e una immaginaria. Ottenendo una \mathbf{Z}_{buoy} complessa è allora possibile distinguere le due componenti:

$$\begin{aligned} Re[\mathbf{Z}_{buoy,11}] &= B_{11}(\omega) + B_{V11}(\omega) \\ Im[\mathbf{Z}_{buoy,11}] &= \omega(M_{11} + A_{11}(\omega)) + \frac{C_{11}}{\omega} \end{aligned}$$

Per ogni prova, dopo aver determinato l'impedenza di boa in componente reale ad una specifica ω , conoscendo la massa M_{11} e la costante di galleggiamento C_{11} è possibile definire quale sia il valore della massa aggiunta $A_{11}(\omega)$ a quella ω specifica a partire dalla seconda equazione:

$$A_{11}(\omega) = \frac{Im[\mathbf{Z}_{buoy,11}]}{\omega} - \frac{C_{11}}{\omega^2} - M_{11} \quad (3.2)$$

Effettuando lo stesso procedimento per le diverse prove è possibile ricreare l'andamento di $A(\omega)$ in funzione della frequenza.

Lo stesso procedimento viene fatto per la componente reale di impedenza, la quale rappresenta direttamente la somma del Damping Factor $B(\omega)$ e del coefficiente di attrito viscoso $B_V(\omega)$:

$$B_{11}(\omega) + B_{V11}(\omega) = Re[\mathbf{Z}_{buoy,11}] \quad (3.3)$$

Essendo necessaria un'analisi a 2 DOF possiamo definire l'impedenza di boa in maniera schematica come a seguire:

$$\mathbf{Z}_{buoy}(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{F_{pto}(\omega)}{\dot{\xi}(\omega)} & 0 \\ 0 & \frac{M_{pto}(\omega)}{\dot{\Gamma}(\omega)} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

dove $\dot{\Gamma}(\omega)$ rappresenta la TdF della velocità angolare. Facendo allora il medesimo ragionamento per tutti i termini della matrice si andranno ad ottenere delle matrici di Massa Aggiunta e di Damping Factor di ordine 2×2 come atteso. Tali coefficienti sono utilizzati nelle analisi che verranno descritte a seguire.

3.2.2 Prova di Eccitazione

A livello ideale si va ora ad imporre un moto ondoso armonico piano attraverso il generatore al canale, con galleggiante bloccato ad entrambe le estremità. Ne deriva il galleggiante in condizioni di equilibrio idrostatico, quindi dall'Equazione di Moto si ha il termine $\dot{\xi}(\omega) = 0$. A fronte di una forza di eccitazione $F_{ex}(\omega)$ dovuta dal moto ondoso è allora possibile calcolare direttamente la forza agente sul galleggiante attraverso le celle di carico disposte sull'asta di collegamento dell'attuatore e al vincolo. Si può infatti facilmente osservare che in queste condizioni $F_{ex}(\omega) = -F_{pto}(\omega)$. Definita con $\eta(\omega)$ l'elevazione d'onda utilizzata durante le diverse prove, è allora possibile definire la funzione di risposta in frequenza di eccitazione della boa $K_{ex}(\omega)$ tramite la seguente definizione:

$$K_{ex}(\omega) = \frac{F_{ex}(\omega)}{\eta(\omega)} \quad (3.5)$$

Nel nostro caso il galleggiante è bloccato da uno solo dei due lati, quello in cui agisce il PTO. Di conseguenza si ha comunque rotazione attorno al perno imposto e non si verifica più l'uguaglianza fra $F_{pto}(\omega)$ e $F_{ex}(\omega)$. Di conseguenza risulta necessario andare a definire il contributo dovuto al movimento per mezzo dell'impedenza di boa ricavata mediante la Prova di Radiazione. Definita allora $F'_{pto}(\omega) = -F_{pto}(\omega)$, possiamo scrivere:

$$F_{ex}(\omega) = \mathbf{Z}_{buoy} \cdot \dot{\xi}(\omega) + F'_{pto}(\omega) \quad (3.6)$$

Effettuato tale procedimento, sempre per i 2 DOF, è possibile trovarsi, come fatto prima, la funzione di risposta in frequenza di eccitazione $K_{ex}(\omega)$.

3.2.3 Prova a galleggiante libero

Infine, nell'ultima prova si ha imposizione di moto ondoso senza alcuna azione da parte del PTO. Si avrà allora $F_{pto} = 0$ e sola influenza della forza di eccitazione. Tale prova, pur non essendo utile ai fini della definizione dei coefficienti idrodinamici, dato che non si conoscono i valori della forza di eccitazione F_{ex} così come quelli dell'impedenza di boa, ha però notevole interesse per la definizione del modello numerico del sistema. L'implementazione di tale modello nell'ambiente Simulink, permette di simulare condizioni equivalenti a quella della prova in questione, potendo allora verificare l'attendibilità dei valori dei vari coefficienti confrontando i risultati di simulazione e le analisi sperimentali nei movimenti del galleggiante.

3.3 Prova di Radiazione Sperimentale

Dopo aver definito la struttura del WA e i sistemi di analisi, andiamo ora ad indagare nello specifico i risultati sperimentali ottenuti. In primo luogo è necessario definire il tipo di prove effettuate. Si distingue il caso sperimentale di prova di Radiazione ai casi di Eccitazione e a Galleggiante Libero. In entrambi i casi sono state effettuate delle analisi a diverse frequenze e diverse altezze (d'onda o di spostamento al PTO) in funzione delle condizioni verificabili in mare aperto considerando i fattori di scala. In Figura 3.8 sono rappresentate le casistiche di analisi per prova di Eccitazione e a Galleggiante Libero nella parte superiore, mentre in basso si hanno le casistiche per prova di Radiazione.

	T=0.5 s	T=0.7 s	T=0.8 s	T=0.9 s	T=1.0 s	T=1.2 s	T=1.5 s	T=2.0 s
H=1.0 cm	X							
H=2.5 cm	X	X	X	X	X	X		
H=5.0 cm				X	X	X	X	X
H=10 cm					X	X	X	X
H=15 cm						X	X	X
H=20 cm							X	X

	T=0.5 s	T=0.7 s	T=0.8 s	T=0.9 s	T=1.0 s	T=1.2 s	T=1.5 s	T=2.0 s
A=1.0 cm	X	X	X	X	X	X		
A=2.0 cm	X	X	X	X	X	X	X	X
A=3.0 cm		X	X	X	X	X	X	X
A=5.0 cm					X	X	X	X

Figura 3.8: Casistica analisi per Prova di Eccitazione e a Galleggiante Libero (alto) e per Prova di Radiazione (basso)

Partiamo con l'analisi della prova di Radiazione dove, a titolo di esempio, considereremo il caso di spostamento verticale dell'attuatore impostato a 5 cm e periodo di 1 s ($f = 1 Hz$).

A partire dai risultati sperimentali in un primo momento sono stati definiti i valori mediati degli spostamenti, al PTO e al vincolo, nel corso dell'intera prova in condizioni a regime. Si può osservare tali andamenti in Figura 3.9. Si può allora da subito notare che, mentre lo spostamento al PTO è vincolato al movimento dell'attuatore stesso a 5 cm in corrispondenza del vincolo, a causa di attriti, si ha uno spostamento inferiore (poco meno di 3 centimetri). Inoltre il movimento in corrispondenza del vincolo risulta avere un andamento distorto rispetto a quello sinusoidale per lo stesso motivo. Si osserva infine che i due spostamenti medi possono essere considerati in opposizione di fase, come è lecito attendersi per questo tipo di dinamica a 2 DOF.

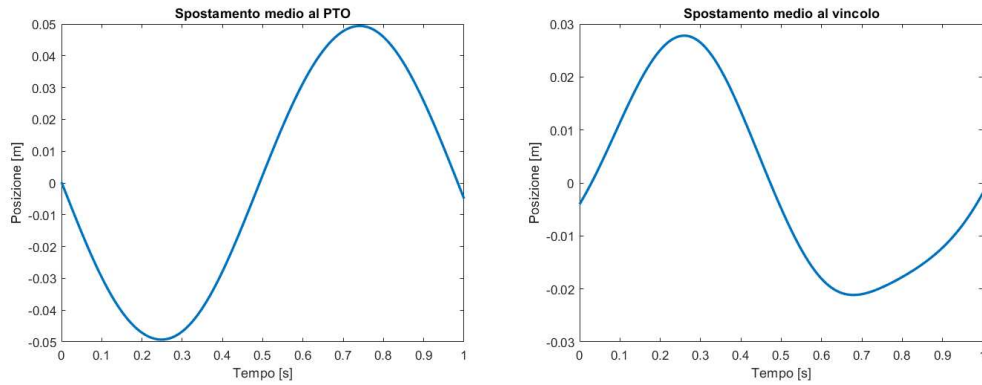


Figura 3.9: Spostamento sperimentale medio al PTO e al vincolo

Lo stesso tipo di analisi è stato fatto sulla forza misurata dalla cella di carico in corrispondenza del PTO. Anche in questo caso (Figura 3.10) l'andamento si discosta abbastanza da quello sinusoidale.

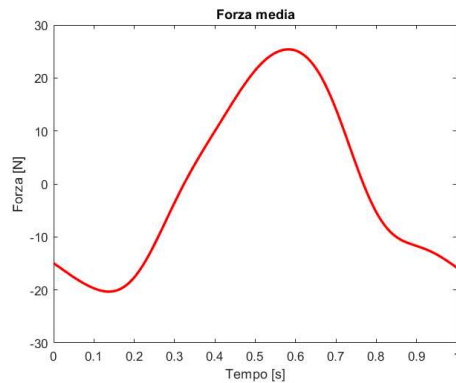


Figura 3.10: Forza media sperimentale

3.3.1 Sfasamento Posizione-Forza

Risulta interessante andare a definire quale sia lo sfasamento fra forza e spostamento verticale al PTO nella prova di Radiazione: tale parametro è strettamente collegato al Damping Coefficient $B(\omega)$.

Lo sfasamento può essere definito attraverso 3 diverse metodologie: determinazione diretta nel dominio del tempo, valutazione delle fasi attraverso la Trasformata di Fourier, utilizzo dello strumento matematico di correlazione fra due segnali.

Lo sfasamento Posizione-Forza attraverso **analisi diretta nel dominio del tempo** risulta quello di più facile implementazione. La valutazione viene effettuata direttamente dai segnali di elevazione media al PTO e forza media, rappresentati precedentemente in Figura 3.9 e Figura 3.10. Si può allora individuare l'istante nel quale si ha valore di picco (si potrebbe anche prendere il minimo o il passaggio per lo zero) sia per spostamento al PTO che per la forza. La differenza temporale Δt fra i due picchi può allora essere riportata a gradi sessagesimali attraverso $\theta = (\Delta t \cdot 360^\circ)/T$, dove T indica il periodo. Nel caso in analisi si ottiene uno sfasamento forza.posizione pari a $49,5^\circ$.

Analizziamo ora un secondo metodo attraverso l'utilizzo della **correlazione**. Questa rappresenta uno strumento matematico usato frequentemente nella teoria dei segnali al fine di analizzare funzioni ed insiemi di valori. Permette infatti, a partire da due segnali definiti nel dominio del tempo, di rappresentare la misura di similitudine fra questi come funzione di uno spostamento o di una traslazione temporale. L'implementazione in Matlab è abbastanza immediata. Si ottiene un segnale sinusoidale decrescente simmetricamente rispetto all'origine, con asse dei tempi doppio rispetto ai segnali originali, dal valore massimo di tempo allo stesso invertito di segno. Si ha interesse a valutare l'istante di tempo al quale si ha il primo picco nell'asse positivo dei tempi. Individuato tale valore Δt , come fatto precedentemente, è possibile definire quale sia lo sfasamento Posizione-Forza. Si nota poi che, analizzando un moto regolare, si ottiene lo stesso Δt analizzando il primo picco o 2 qualsiasi picchi adiacenti. Nel caso in analisi si ottiene uno sfasamento Posizione-Forza pari a $64,8^\circ$.

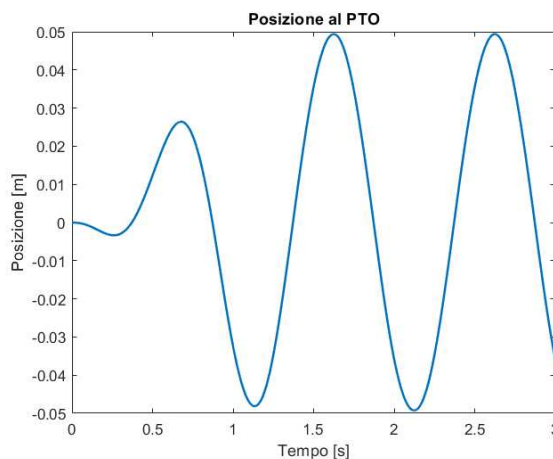


Figura 3.11: Posizione al PTO moltiplicata per funzione di regolarità

Come ultimo metodo può essere utilizzata la **Trasformata di Fourier**. Verranno a seguito descritti i diversi passaggi per l'individuazione dello sfasamento Posizione-Forza. A partire dal segnale di posizione al PTO e di forza nel dominio del tempo viene considerato il solo intervallo di spostamento a regime. Tali segnali vengono poi moltiplicati per una funzione di regolarità, caratterizzata per essere crescente in maniera esponenziale al valore unitario nei primi secondi e decrescente in modo simmetrico verso la fine dell'intervallo di campionamento, rimanendo pari a 1 per tutto il resto della lunghezza del segnale. Questo procedimento viene fatto per garantire che il segnale analizzato abbia valore uguale (e nullo) all'inizio e alla fine, consentendo di migliorare i risultati dell'analisi in un'opportuna finestra temporale. Si può osservare l'andamento della funzione risultante di posizione al PTO nei primi istanti dopo aver effettuato l'operazione descritta in Figura 3.11. Lo stesso procedimento viene fatto per la funzione di forza rilevata al PTO.

Date le funzioni ottenute è allora possibile effettuare la Trasformata di Fourier. Questo è lo strumento matematico più utilizzato per analisi di segnali periodici. L'idea di base è che ogni segnale periodico può essere definito come somma di più funzioni sinusoidali alle diverse frequenze. Definito quindi $f(t)$ il segnale nel dominio del tempo, la sua trasformata di Fourier è data dalla seguente relazione:

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)[\cos(\omega t) - j\sin(\omega t)] \quad (3.7)$$

Si può quindi definire il segnale a partire dal suo contenuto in frequenza. Nel caso di andamento quasi sinusoidale per posizione e forza ci si aspetta di ottenere una funzione $F(\omega)$ con contenuto armonico elevato alla frequenza di oscillazione, avendo invece valori quasi nulli per le altre frequenze.

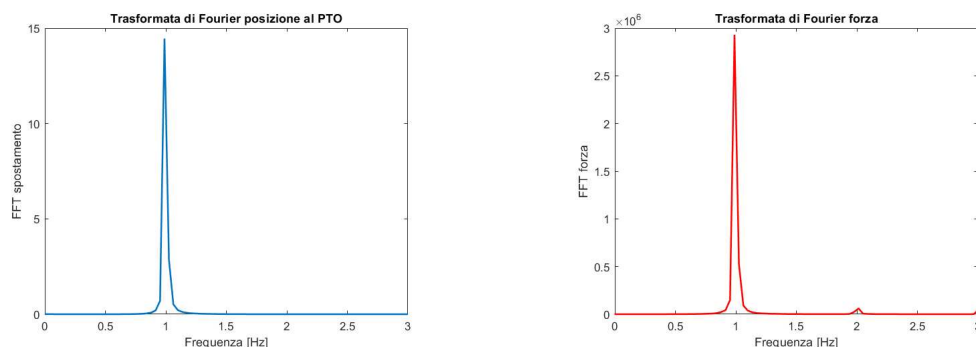


Figura 3.12: Trasformata di Fourier della posizione al PTO e della forza

Implementando la Trasformata di Fourier su Matlab (la Fast Fourier Transform nello specifico) si ottengono gli spettri armonici per posizione al PTO e forza in Figura 3.12. Le funzioni riportate rappresentano lo spettro della funzione, si ricorda però che per definizione la Trasformata di Fourier fornisce una funzione complessa, quindi con componente reale e componente immaginaria.

A partire dalla Trasformata effettiva è possibile definire il valore di massimo e in particolare la fase per posizione e forza in corrispondenza della frequenza di picco. Conoscendo tale valore risulta immediato ottenere lo sfasamento Posizione-Forza come differenza fra le fasi dei due diversi segnali. Nel caso in analisi si ottiene un valore pari a $64,2^\circ$.

Numero prova	TEMPO	CORRELAZIONE	FOURIER
1	154.2	153.0	152.5
2	153.3	153.6	153.3
3	124.1	122.4	122.5
4	123.1	122.0	122.0
5	125.0	122.0	121.4
6	53.4	46.9	43.3
7	95.1	77.6	77.0
8	105.4	86.3	85.4
9	53.0	61.7	59.6
10	61.2	65.3	63.8
11	65.6	68.7	67.3
12	32.0	47.1	47.0
13	36.9	45.9	46.6
14	40.1	49.2	49.9
15	49.5	64.8	64.9
16	29.1	29.5	28.1
17	27.9	28.8	27.9
18	30.5	28.8	28.2
19	36.4	41.5	40.7
20	10.9	16.6	16.7
21	11.5	16.6	16.9
22	28.8	24.4	24.5
23	14.9	10.2	10.1
24	16.6	9.5	9.5
25	30.0	15.7	16.2

Figura 3.13: Sfasamento in gradi Posizione-Forza con metodi di dominio del tempo, correlazione e Trasformata di Fourier

In Figura 3.13 sono stati raccolti i risultati di sfasamento Posizione-Forza con i 3 diversi metodi di analisi per ogni prova effettuata a livello sperimentale. In generale, si riscontra un buon accordo dei risultati fra metodo di correlazione e attraverso la Trasformata di Fourier, mentre in certi casi si ottengono risultati discordanti con l'analisi nel dominio del tempo. In effetti, nel caso di andamento non esattamente sinusoidale delle grandezze (come capita spesso nelle prove) questo metodo porta a dei risultati inesatti. Prenderemo allora in considerazione gli altri due per le nostre analisi, in particolare utilizzeremo i valori derivati dalla Trasformata di Fourier.

A partire dai risultati in Figura 3.13 possono essere fatti dei grafici tali da comprendere al meglio l'andamento dello sfasamento in funzione di altri parametri.

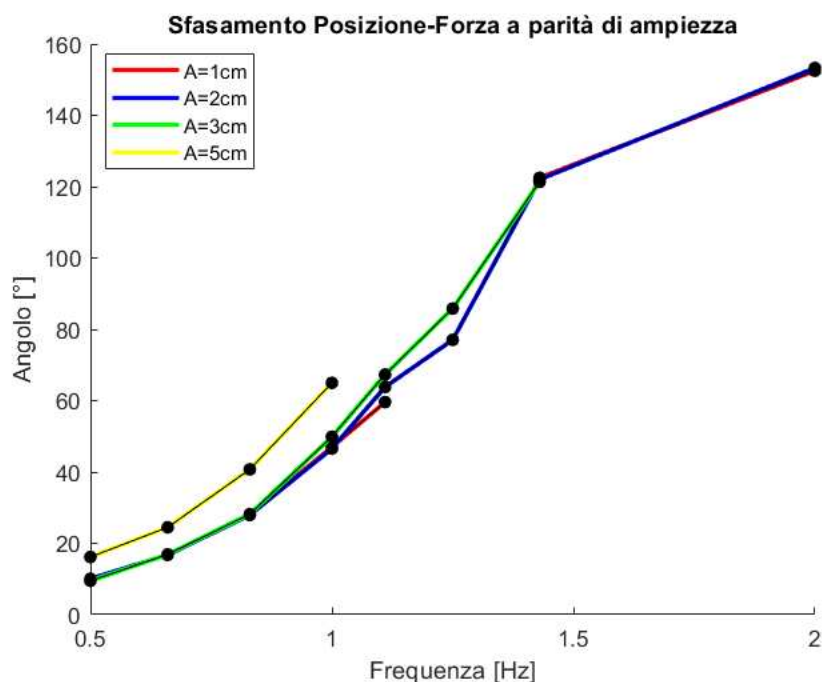


Figura 3.14: Sfasamento Posizione-Forza a parità di ampiezza

In Figura 3.14 sono rappresentati gli sfasamenti fra Posizione al PTO e Forza in funzione della frequenza a parità di ampiezza di oscillazione. Si può allora osservare un aumento dello sfasamento all'aumentare della frequenza. Come ci si può aspettare a livello intuitivo si ha, con l'aumento della frequenza e quindi della velocità, una posizione sempre più in ritardo rispetto alla forza applicata.

In Figura 3.15 sono invece rappresentati gli stessi andamenti, però in funzione dell'ampiezza applicata a parità di frequenza. In tale grafico risulta rilevante osservare la quasi totale irrilevanza dell'ampiezza di spostamento a parità di frequenza: si può osservare una sola leggera crescita negli andamenti all'aumentare dell'ampiezza.

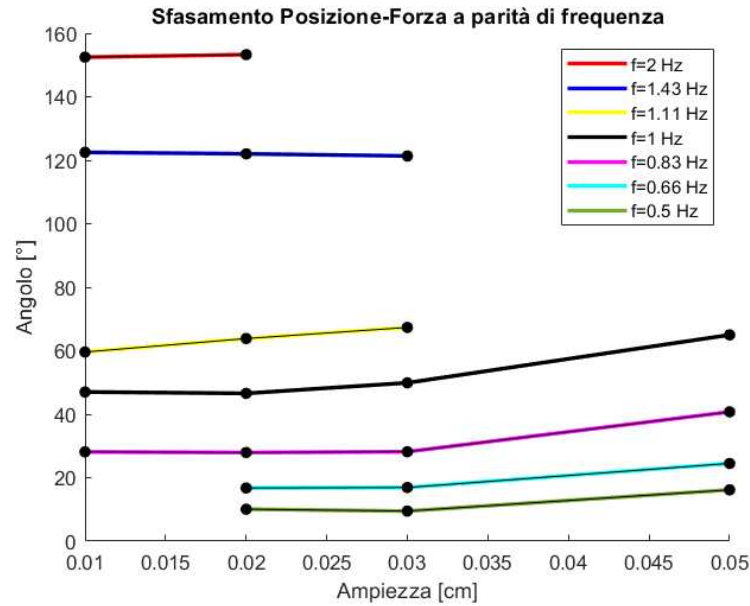


Figura 3.15: Sfasamento Posizione-Forza a parità di frequenza

3.3.2 Centro di rotazione

Al fine di comprendere al meglio il movimento del galleggiante in analisi risulta interessante andare a definire quale sia il centro di rotazione alle diverse prove. Si ha infatti applicazione di una forza ad una sola delle due estremità del galleggiante, comportando un centro di rotazione non corrispondente con il centro di massa dell'oggetto ma funzione di ampiezze e frequenze applicate.

Al fine di valutare il centro di rotazione è stata definita la posizione del centro di massa come valor medio fra le posizioni agli estremi. Nel caso in analisi si ottiene l'andamento in Figura 3.16, ancora sinusoidale con valori inferiori in ampiezza rispetto allo spostamento agli estremi. Sempre a partire dalla posizione agli estremi è possibile andare a definire l'angolo di rotazione attraverso la seguente formula:

$$\Phi = \text{atan}\left(\frac{\xi_{PTO} - \xi_{vincolo}}{B}\right) \quad (3.8)$$

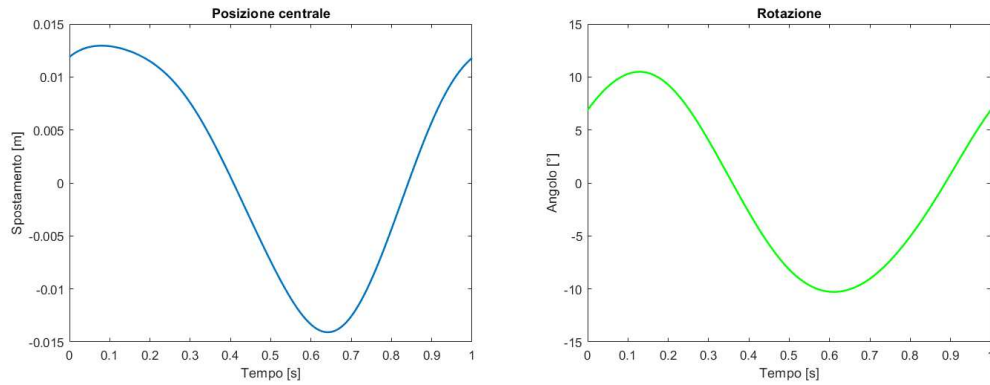


Figura 3.16: Spostamento verticale al centro di massa del galleggiante e angolo di rotazione

dove ξ_{PTO} e $\xi_{vincolo}$ sono rispettivamente le posizioni verticali misurate all'attuatore e alle guide di scorrimento, mentre B rappresenta la larghezza del galleggiante ($B = 40\text{cm}$ per il WA analizzato). Si ottiene un andamento ancora sinusoidale come si può osservare in Figura 3.16.

Conoscendo posizione al centro ed angolo di rotazione è possibile definire quale sia il centro di rotazione relativo al centro di massa come rapporto fra le deviazioni standard di posizione centrale e angolo di rotazione.

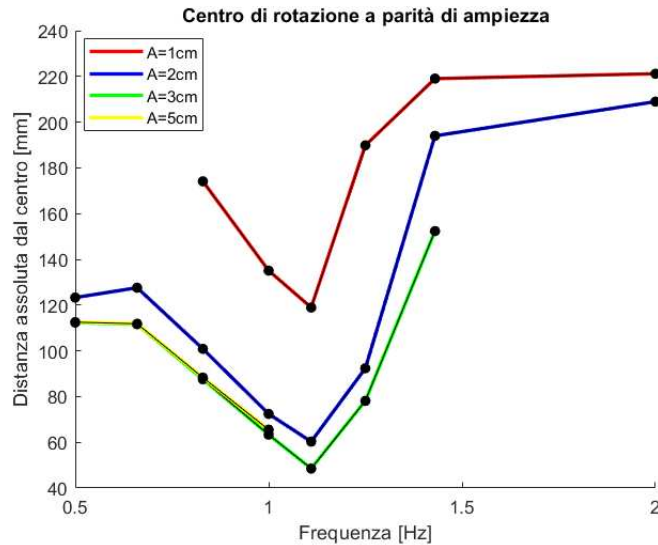


Figura 3.17: Distanza del centro di rotazione relativo rispetto al centro di massa a parità d'ampiezza

Ripetendo tale procedimento per le varie prove prima effettuate è possibile graficare, come fatto prima, gli andamenti in funzione della frequenza a parità di ampiezza di oscillazione. In Figura 3.17 è possibile osservare un andamento grosso modo parabolico parzialmente sovrapponibile per le varie ampiezze tranne che per il caso di ampiezza pari a 1 centimetro. Infatti, per tale ampiezza (corrispondente al valore minimo) risulta prevalente l'effetto dei forti attriti fra galleggiante e pali di scorrimento che determina il maggior allontanamento del centro di rotazione rispetto al centro di massa. Si può infine osservare che per frequenze alte si ottengono dei valori di distanza dal centro di rotazione maggiore della semilarghezza del galleggiante, ovvero 0.2 m. Questo è dovuto al fatto che, essendo la frequenza elevata, non si dà il tempo alla struttura di portarsi in condizioni di oscillazione naturale: l'azione del PTO tende a ridurre lo sfasamento tra i movimenti delle due estremità del WA rendendo il moto di quest'ultimo prevalentemente traslatorio.

3.3.3 Definizione sperimentale dei coefficienti idrodinamici a 2 DOF

Come visto ad inizio capitolo, per mezzo della prova di Radiazione, è possibile determinare i coefficienti idrodinamici caratterizzanti della boa, ovvero più precisamente la massa aggiunta $A(\omega)$ e la somma di Damping Factor $B(\omega)$ e il fattore di attrito viscoso $B_{drag}(\omega)$.

È stata definita l'impedenza di boa Z_{buoy} a 2 DOF come:

$$\mathbf{Z}_{buoy}(\omega) = \begin{bmatrix} \frac{F_{pto}(\omega)}{Z(\omega)} & 0 \\ 0 & \frac{M_{pto}(\omega)}{\dot{\Gamma}(\omega)} \end{bmatrix}$$

dove $\dot{\Gamma}(\omega)$ rappresenta la velocità angolare e tutte le grandezze sono definite come trasformata di Fourier.

A livello pratico sono stati definiti gli spettri di Fourier per i segnali di forza, momento, velocità tangenziale e rotazionale. È stato allora calcolata la fase e l'integrale sotteso alla TdF di ciascuna funzione. Si sarebbe anche potuto utilizzare il valore di picco della TdF ma attraverso l'integrale sotteso si ottiene un più elevato grado di precisione. È stato possibile definire il modulo dei termini dell'impedenza di boa come rapporto degli integrali di forza e velocità tangenziale, quindi di momento e velocità angolare. La matrice di fase è stata ottenuta facendo la differenza tra le fasi al numeratore e al denominatore. Moltiplicando infine la matrice di modulo per il coseno della matrice di angolo si è ottenuta la componente reale di impedenza, facendo lo stesso per il seno se ne è ricavata la componente immaginaria.

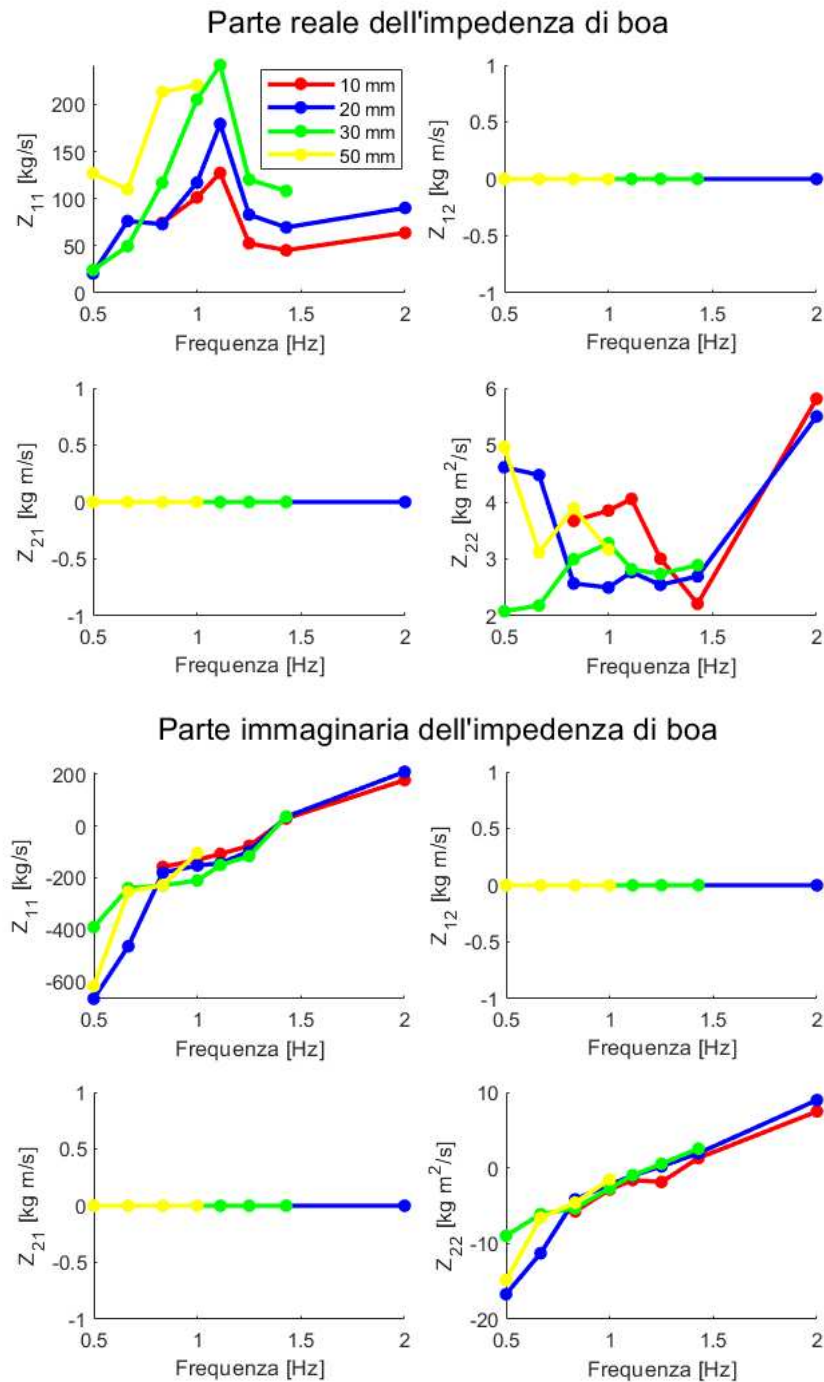


Figura 3.18: Parte reale ed immaginaria dei termini dell'impedenza di boa a 2 DOF

Replicando tale procedimento per le varie prove effettuate è stato possibile definire l'impedenza di boa a 2 DOF in funzione della frequenza. In Figura 3.18 si può osservare l'andamento dell'impedenza di boa a parità di spostamento al PTO in componente reale ed immaginaria in funzione della frequenza. Risulta immediato osservare come la componente immaginaria, legata alla Massa Aggiunta, presenti un andamento più omogeneo rispetto alla componente reale, legata al Damping Factor.

Conoscendo la parte immaginaria dell'impedenza di boa è possibile calcolare in base alla (3.2) la Massa Aggiunta del galleggiante $A(\omega)$ in funzione della frequenza. Facendo allora tale analisi per le diverse prove si ottiene la massa aggiunta $A(\omega)$ a 2 DOF rappresentata in Figura 3.19.

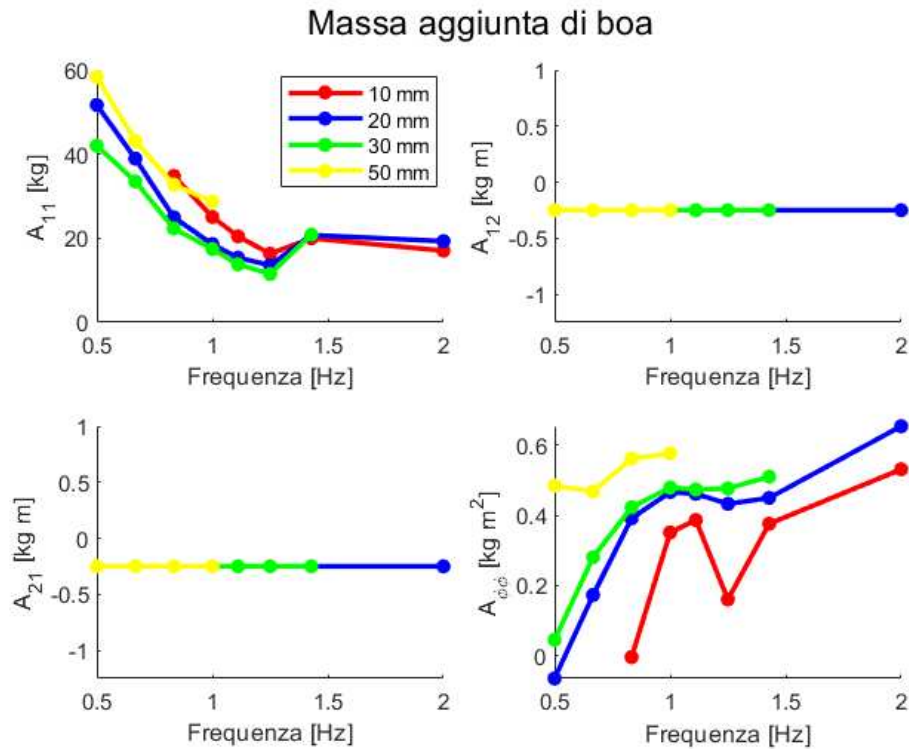


Figura 3.19: Massa aggiunta di boa a 2 DOF

Allo stesso modo si era vista la definizione del Damping Coefficient $B(\omega)$ sommato al coefficiente di attrito viscoso $B_V(\omega)$ funzione della componente reale dell'impedenza di boa in (3.3), potendo essere ricavato dall'analisi sperimentale ottenendo il grafico in Figura 3.20 per 2 gradi di libertà. Si può osservare che, a differenza della Massa Aggiunta, in questo caso a level-

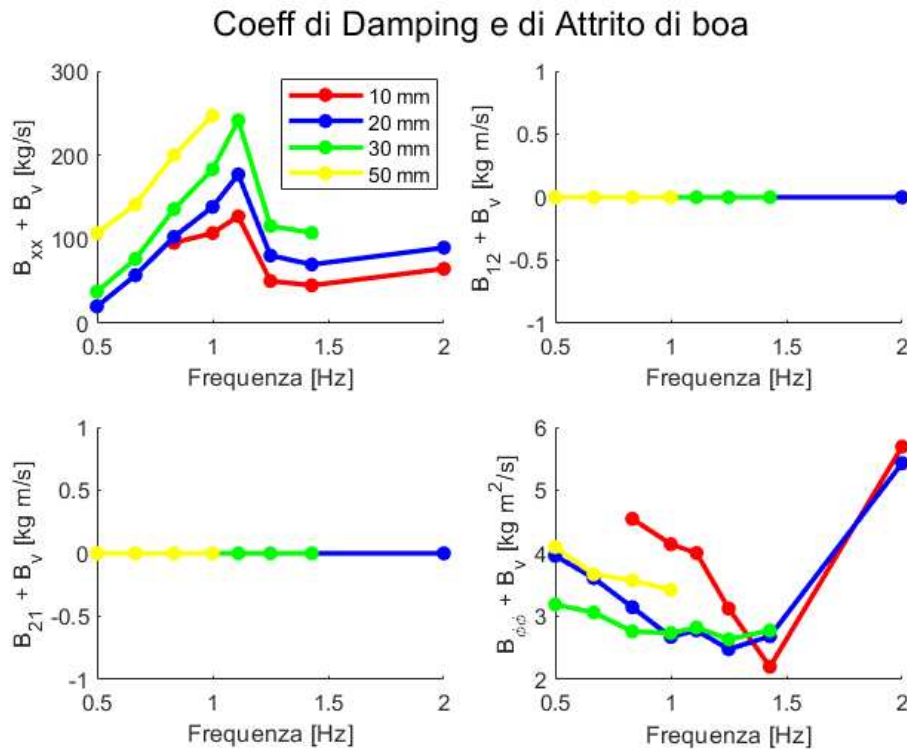


Figura 3.20: Coefficiente di Damping e di Attrito Viscoso di boa a 2 DOF

lo sperimentale si ha una marcata dipendenza dall'ampiezza di oscillazione applicata.

Si ha ora interesse nel confrontare i risultati sperimentali ottenuti con quelli invece ricavati da NEMOH con metodo BEM a scopo di validazione. In Figura 3.21 sono rappresentati i valori messi a confronto per massa aggiunta e damping factor. Risulta importante osservare che: il primo valore (a 0.1 Hz) per Massa Aggiunta e per Damping Factor non deriva da analisi sperimentali ma è stato imposto in maniera arbitraria a posteriori; nel caso di Damping Factor si osserva che mentre NEMOH fornisce direttamente il solo valore di $B(\omega)$, a livello sperimentale si va definire anche la componente di attrito viscoso. Dal confronto ne deriva elevata somiglianza per i termini di elevazione verticale, con invece andamenti più discordi per i termini rotazionali. Questo comportamento è principalmente dovuto al fatto che NEMOH va a definire i coefficienti idrodinamici in condizioni lineari. D'altra parte, la rotazione risulta l'aspetto maggiormente affetto dagli attriti al vincolo, causando queste differenze nei andamenti ottenuti.

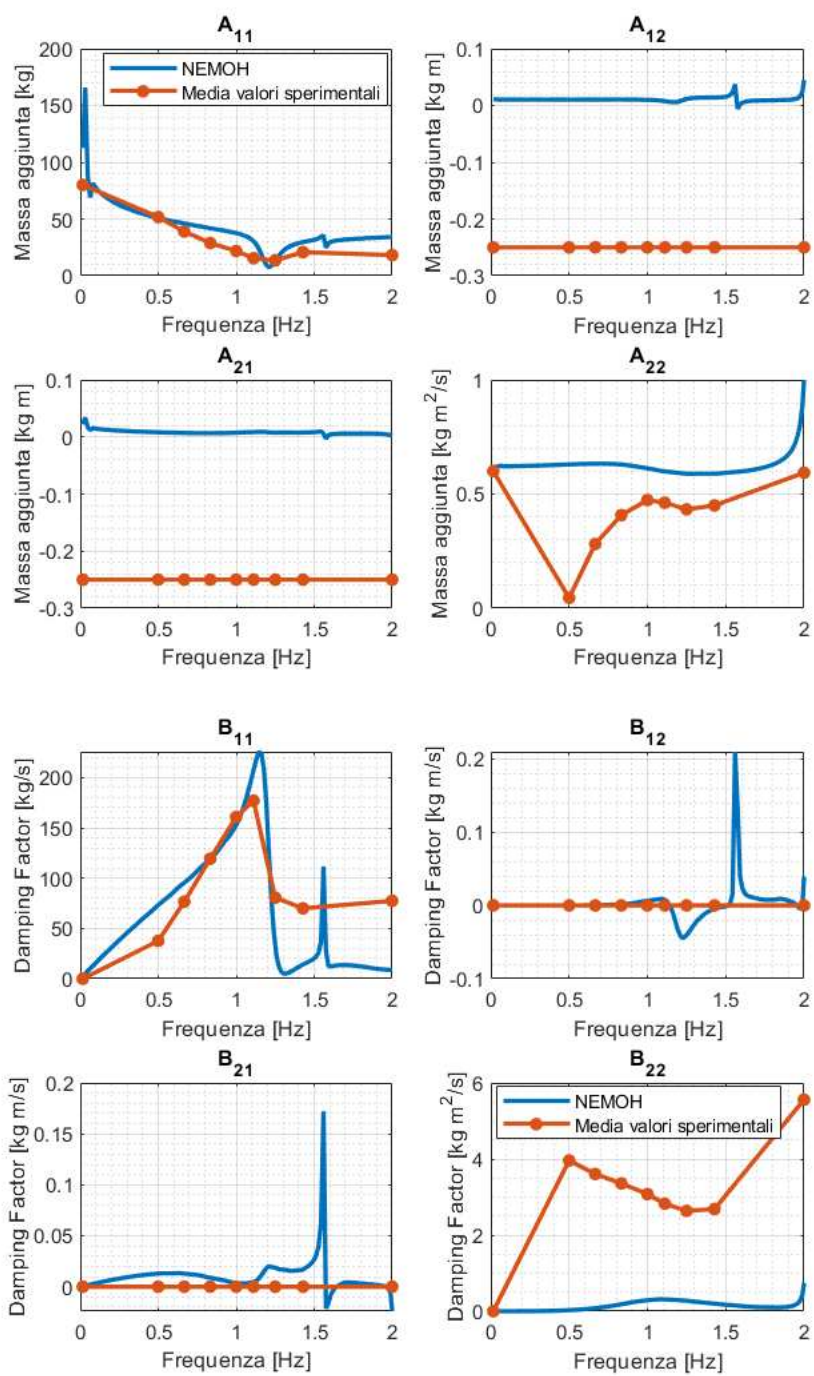


Figura 3.21: Confronto fra Massa Aggiunta (sopra) e Damping Factor (sotto) calcolati con NEMOH e per via sperimentale

3.3.4 Risposta impulsiva radiativa

Prima di arrivare all'implementazione in Simulink del modello simulativo della boa è necessario qualche ulteriore sviluppo a partire dall'Equazione di Cummins nel dominio del tempo, riscritta nel seguito per un singolo grado di libertà.

$$F_{pto} - \int_{-\infty}^{\infty} k_{ex}(\tau) \cdot \eta(t - \tau) d\tau = [M + A_{\infty}] \ddot{\xi}(t) + B_V \dot{\xi}(t) + C \cdot \xi(t) + \int_{-\infty}^{\infty} k_{rad}(\tau) \cdot \dot{\xi}(t - \tau) d\tau$$

Uno dei termini da definire, per eseguire l'analisi nel dominio del tempo attraverso Simulink, è la risposta impulsiva radiativa k_{rad} .

Ricordiamo che, in frequenza, $\mathbf{K}_{rad}(\omega)$ è stata definita come:

$$\mathbf{K}_{rad}(\omega) = [B(\omega) + B_V(\omega) + j\omega(A(\omega) - A_{\infty})] \quad (3.9)$$

È poi possibile applicare la definizione di antitrasformata di Fourier alla $K_{rad}(\omega)$ stessa, andando ad ottenere:

$$\begin{aligned} \mathbf{K}_{rad}(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} k_{rad}(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} [k_{rad}(t) \cos(\omega t) - j k_{rad}(t) \sin(\omega t)] dt \end{aligned}$$

Dal confronto con l'Equazione (3.9) è quindi possibile mettere in relazione la risposta impulsiva radiativa $\mathbf{K}_{rad}(\omega)$ con i coefficienti idrodinamici:

$$\begin{aligned} B(\omega) + B_V(\omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} k_{rad}(t) \cos(\omega t) dt \\ A(\omega) &= A_{\infty} - \frac{1}{\omega} \int_{-\infty}^{\infty} k_{rad}(t) \sin(\omega t) dt \end{aligned}$$

Tali equazioni possono essere invertite, ottenendo la risposta impulsiva radiativa in funzione del tempo, come di fatto ci interessa per la fase di analisi [23].

$$\begin{aligned} k_{rad}(t) &= \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [B(\omega) + B_V(\omega)] \cos(\omega t) d\omega \\ k_{rad}(t) &= -\frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} [A(\omega) - A_{\infty}] \omega \sin(\omega t) d\omega \end{aligned}$$

Come visto attraverso le prove sperimentali, sono stati ottenuti dei risultati più omogenei per la Massa Aggiunta $A(\omega)$ ed è quindi conveniente utilizzare la seconda delle due relazioni appena sopra riportate per la determinazione di $k_{rad}(t)$. Successivamente, definendo A_∞ come il valore di Massa Aggiunta per $f \rightarrow \infty$, a partire dai valori sperimentali mediati per ogni frequenza della stessa Massa Aggiunta, ci è possibile definire la risposta impulsiva radiativa per 2 DOF ottenendo i grafici in Figura 3.22.

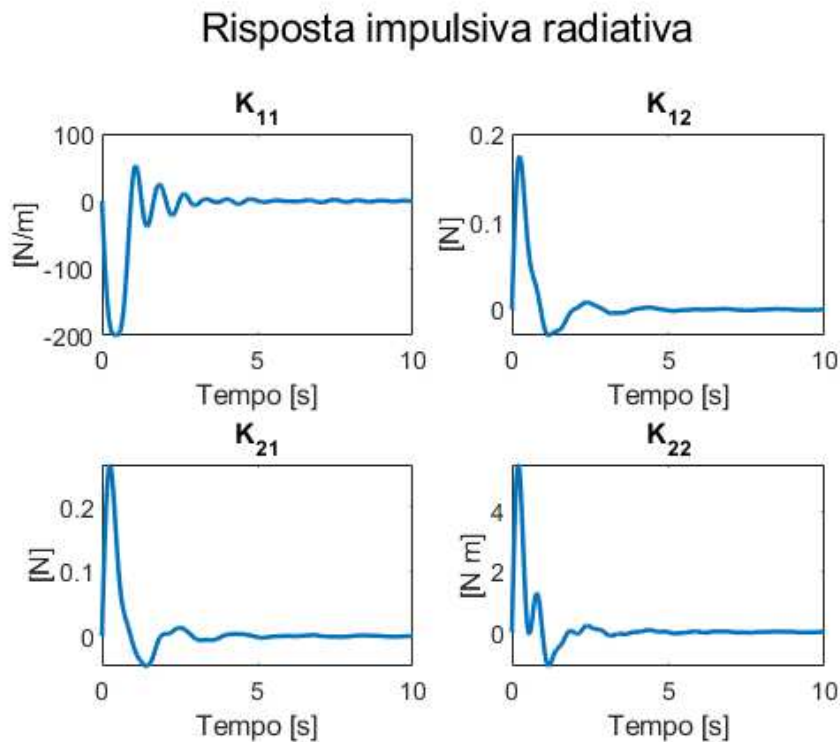


Figura 3.22: Risposta impulsiva radiativa sperimentale a 2 DOF

Dopo aver ottenuto la Risposta Impulsiva Radiativa si ha il problema che, implementando l'Equazione di Cummins nel dominio del tempo attraverso Simulink, la convoluzione della risposta impulsiva con la velocità presenta un costo computazionale molto elevato. Per superare tale problema si può approssimare il sistema integrale associato alla risposta impulsiva radiativa $k_{rad}(t)$ con un sistema in rappresentazione nello spazio di stato del seguente tipo [2]:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ y(t) &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} + Du\end{aligned}$$

dove u rappresenta la variabile di ingresso, y la variabile di uscita, x è il vettore degli stati, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}_{n \times n}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}_{n \times 1}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}_{1 \times n}$, $D \in \mathbb{R}_{1 \times 1}$. L'algoritmo utilizzato per tale operazione è definito come Model Order Reduction e, senza andare troppo nello specifico, può essere riassunto in quattro punti principali:

1. Formare una matrice di Hankel con i campioni della risposta impulsiva radiativa
2. Effettuare una decomposizione ai valori singolari (SVD)
3. Ottenere l'ordine del sistema dal numero di valori singolari diversi da zero
4. Ottenere le matrici del modello nello spazio di stato tramite fattorizzazione

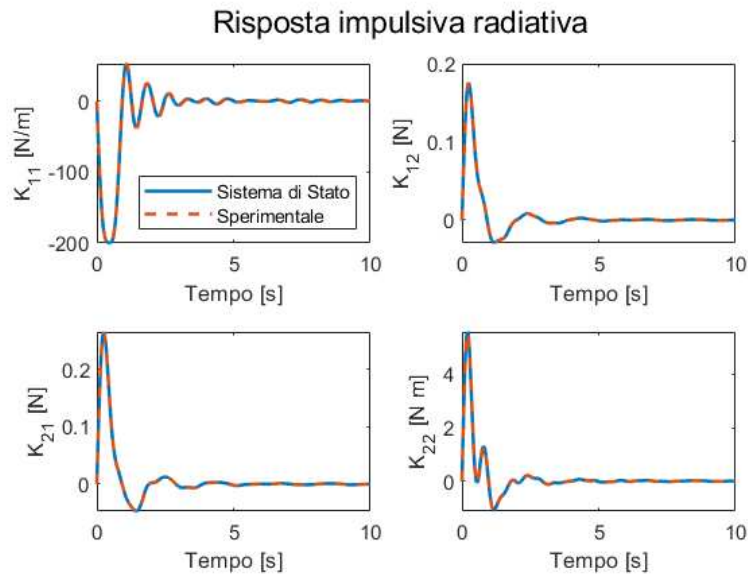


Figura 3.23: Approssimazione della risposta impulsiva radiativa sperimentale a 2 DOF

Effettuando questi passaggi si è in grado di convertire la risposta impulsiva radiativa da convoluzione a sistema di stato, più semplice da integrare in un sistema simulativo e con minor costo computazionale. È allora possibile osservare in Figura 3.23 un confronto fra la risposta impulsiva radiativa $k_{rad}(t)$ ottenuta sperimentalmente e la sua approssimazione nello spazio di stato. Come si può facilmente osservare gli andamenti sono praticamente sovrapponibili.

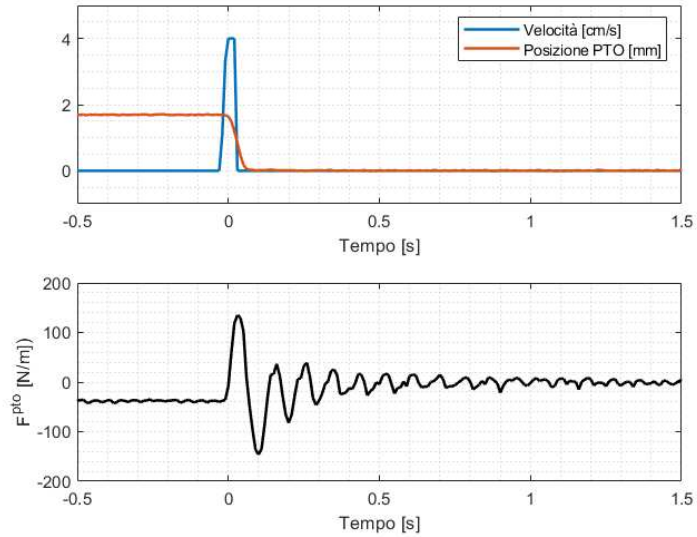


Figura 3.24: Posizione, velocità e forza della risposta impulsiva radiativa

3.3.5 Risposta impulsiva radiativa sperimentale

In sede di laboratorio è stato effettuato anche un test di risposta impulsiva radiativa. A tal fine è stato imposto dal PTO uno scatto di posizione a gradino, andando quindi a generare un impulso nella velocità applicata come si può osservare in Figura 3.24. In corrispondenza del braccio dell'attuatore è stata posta una cella di carico con segnale portato in input al PLC. Al fine

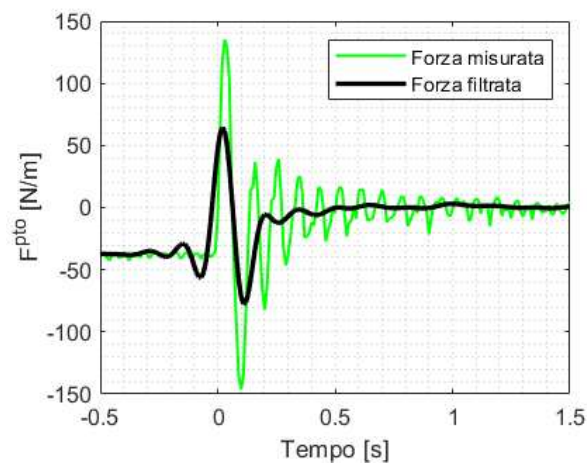


Figura 3.25: Risposta impulsiva misurata e valore della stessa filtrato

di valutare la risposta impulsiva radiativa risulta necessario definire l'area sottesa alla velocità. Determinata tale area si va a normalizzare la forza rilevata all'area calcolata, ottenendo la risposta impulsiva di sistema. La risposta ottenuta tuttavia presenta una forte componente oscillatoria dovuta alle vibrazioni della struttura in seguito al brusco movimento. Ci si è allora serviti di un filtro passabasso al fine di ridurre l'effetto della vibrazione, ottenendo gli andamenti in Figura 3.25. Si osserva infine che il primo picco di forza deriva dalla stessa imposizione del movimento: la risposta impulsiva ha inizio a seguire di tale picco.

3.4 Modello Simulink galleggiante

Dopo aver definito i coefficienti idrodinamici, quindi la risposta impulsiva radiativa, a livello sperimentale, è possibile andare a costruire il modello Simulink del galleggiante riportato in Figura 3.26. A scopo di semplificare la rappresentazione visiva è stato rappresentato lo schema riferito ad un solo DOF. Nelle simulazioni è stato poi utilizzato uno schema a 2 DOF.

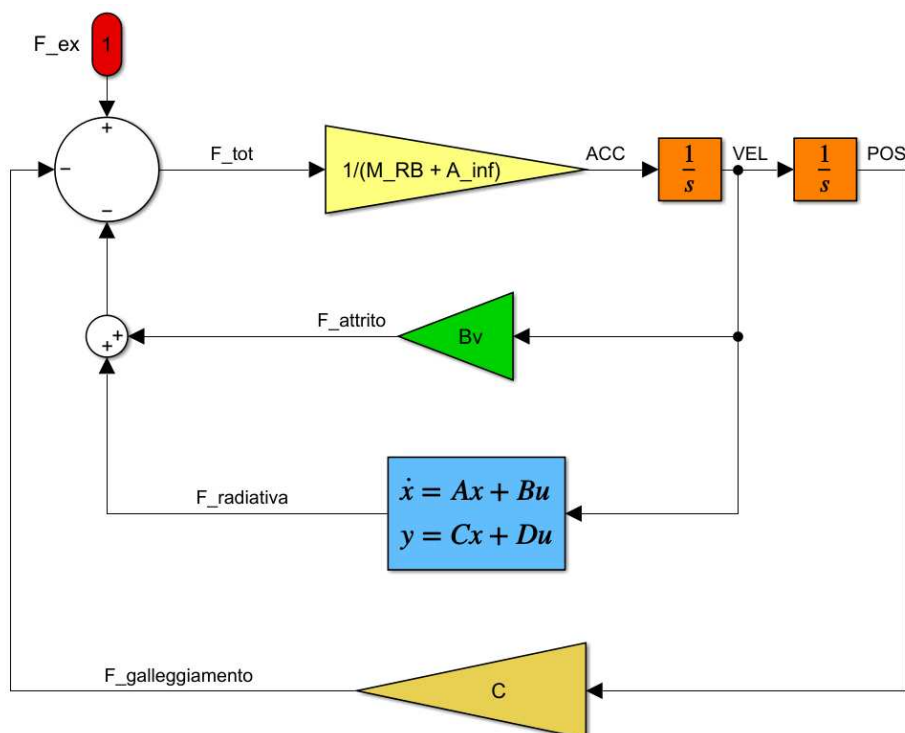


Figura 3.26: Schema Simulink rappresentante l'Equazione di Moto a 1 DOF

Si possono da subito distinguere i 3 blocchi in basso i quali vanno a modellizzare l'interazione fra galleggiante e liquido. Partendo dal basso si ha la forza di galleggiamento la quale, come visto nel Capitolo 2, è definita a partire da un coefficiente di galleggiamento in relazione con la posizione del galleggiante (POS). Ad essere legati alla velocità (VEL) sono invece le componenti di forza dovute all'attrito viscoso e alla radiazione. Per la forza di attrito a moltiplicare la velocità si ha un coefficiente d'attrito B_V , per la forza radiativa è stata ricreato il sistema in forma di stato come precedentemente illustrato. La somma di tali forze, sottratte alla forza di eccitazione delle onde, va a definire la forza totale applicata al galleggiante (F_{TOT}). Dividendo tale forza per la massa di acqua occupata a riposo M_{RB} sommata alla massa aggiunta all'infinito A_∞ si ottiene l'accelerazione quindi, integrando, velocità e posizione.

Il sistema rappresentato in Figura 3.26 è stato poi riportato a 2 DOF mantenendo la stessa logica, ma andando ad operare con vettori e matrici come già illustrato nel Capitolo 2.

3.4.1 Risultati analisi Simulink

Analizziamo ora i risultati simulativi per prova ad elevazione d'onda $H = 50 \text{ mm}$ e periodo $T = 1, 2 \text{ s}$.

Come visto in precedenza, a partire dai coefficienti idrodinamici del WA (in particolare dalla Massa Aggiunta $A(\omega)$) si va a definire la risposta impulsiva radiativa. Per avere una minore complessità computazionale si approssima tale risposta in forma di sistema di stato. Come descritto in precedenza, per la valutazione della forza e del momento di eccitazione ci si è riferiti alle analisi effettuate su NEMOH, ottenendo i valori in funzione dell'elevazione d'onda H e del periodo T . In seguito a questa fase di analisi preliminari è possibile effettuare la simulazione attraverso Simulink. Si è scelto un intervallo temporale di 100 secondi di modo da permettere al sistema di andare a regime. I risultati ottenuti dall'analisi numerica vengono poi confrontati con quelli ottenuti sperimentalmente per le prove corrispettive. In Figura 3.27 è possibile osservare gli andamenti a confronto fra soluzione numerica e valori sperimentali per elevazione al punto centrale e angolo di rotazione del WA. Si ricorda che in tale analisi non si ha utilizzo di PTO: a livello numerico si vanno a ricreare le condizioni della prova a Galleggiamento Libero. È possibile allora osservare una buona concordanza fra i risultati ottenuti. Valutando il rapporto fra i picchi dell'analisi numerica in Simulink e dell'analisi sperimentale, per la prova in questione, si ottengono dei valori percentuali del 85.7% per elevazione centrale e del 99,6% per angolo di rotazione.

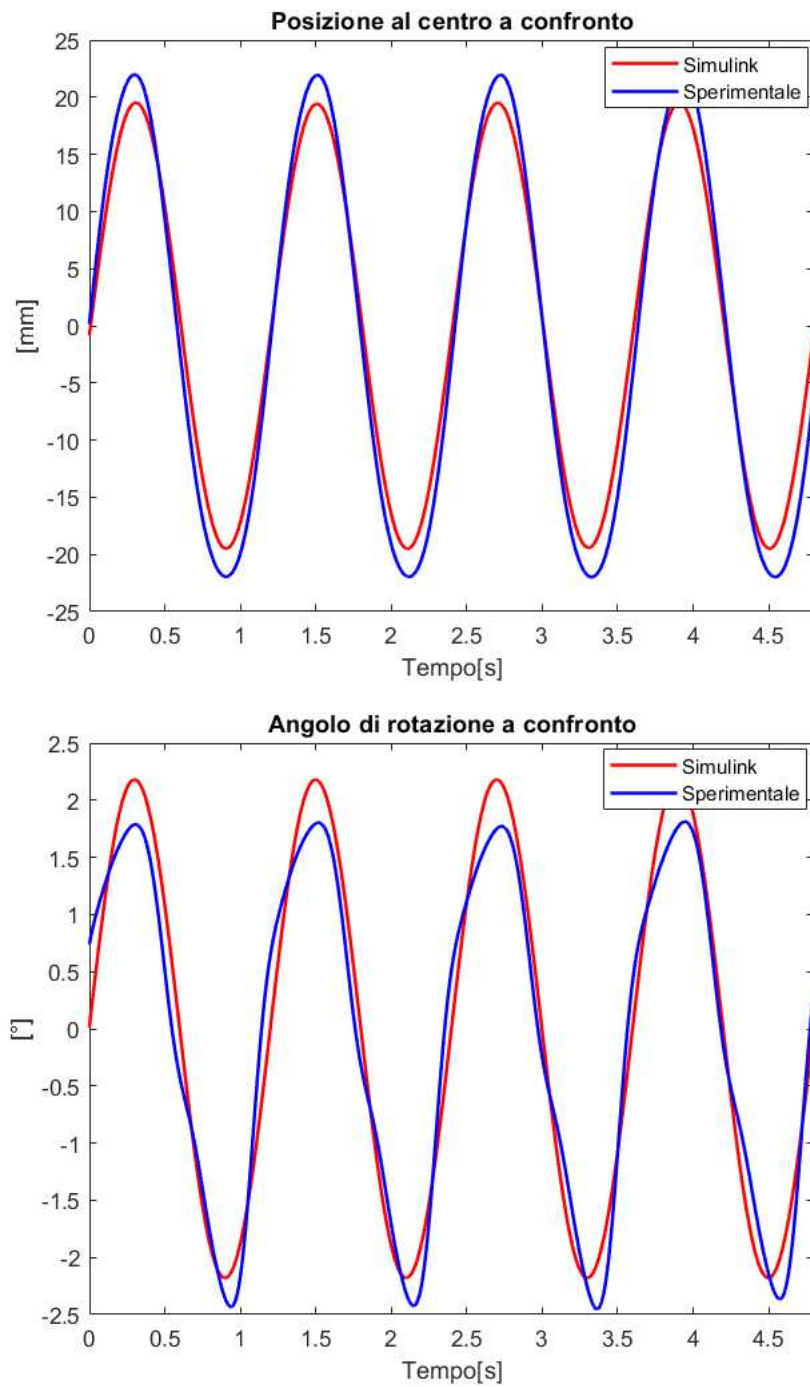


Figura 3.27: Posizione centrale e rotazione del WA a confronto per analisi sperimentale e simulazione Simulink

In seguito è stata effettuata un'analisi più estesa e generale a livello simulativo per il range di prove effettuato a livello sperimentale.

In Tabella 3.28 sono presentati i risultati complessivi. Nel caso di elevazione centrale si ottiene errore ridotto, lo stesso non può però essere detto nel caso dell'errore di angolo. Principale problematicità sussiste nella definizione del coefficiente di attrito B_V . Non avendo possibilità di valutare tale grandezza ne è stato considerato un valore costante per le diverse prove, quando già dalla rilevazione del centro di rotazione si è osservata una variabilità in funzione delle condizioni operative. Si potrebbe andare a definire tale coefficiente prova per prova al fine di garantire condizioni equivalenti con l'analisi sperimentale, andando però a togliere di generalità la logica stessa della simulazione.

Numero Prova	H [mm]	T [s]	RAPPORTO POSIZIONE [%]	RAPPORTO ANGOLO [%]
1	25	0.9	99	54
2	50	0.9	104	41
3	25	1	85	118
4	50	1	90	69
5	100	1	111	54
6	25	1.2	90	208
7	50	1.2	86	99
8	100	1.2	90	80
9	150	1.2	79	62
10	50	1.5	87	148
11	100	1.5	85	125
12	150	1.5	87	90
13	200	1.5	92	80
14	50	2	81	102
15	150	2	81	87
16	200	2	80	71

Figura 3.28: Tabella di confronto di posizione centrale e rotazione del WA per analisi sperimentali e simulazioni Simulink

In Figura 3.29 è possibile osservare i risultati graficati in Tabella ritrovando le discordanze prima osservate. In futuro sarà utile effettuare un'attenta valutazione della forza di eccitazione al fine di garantire una migliore analisi in fase simulativa, ottenendo quindi risultati più generali. In particolare, potrebbe essere conveniente effettuare la prova di Eccitazione con entrambi i lati del PTO fissati e connessi a delle celle di carico. A partire da tale misura risulterà molto più immediato andare a definire la forza e il momento di eccitazione, modellizzando in maniera più coerente il sistema.

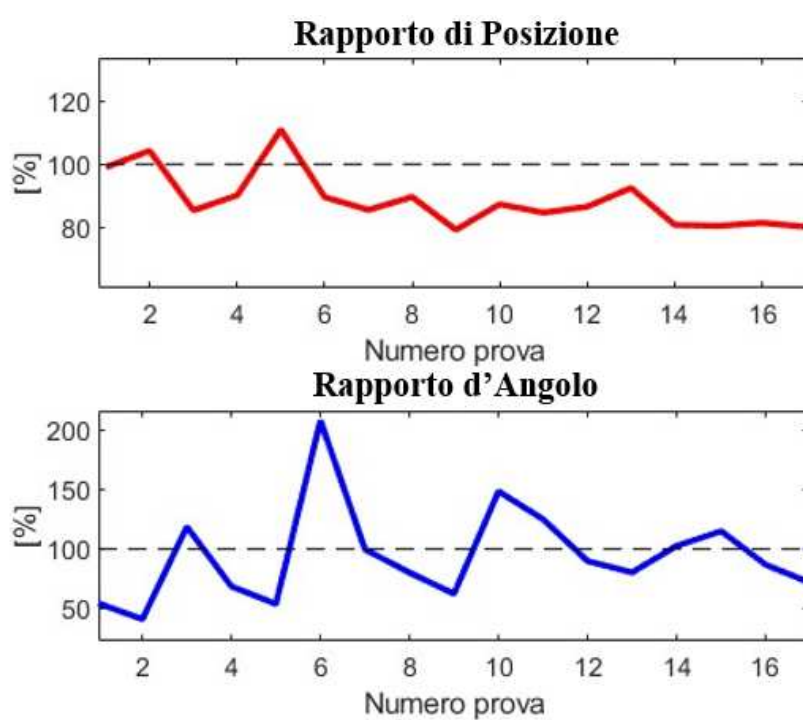


Figura 3.29: Grafico di confronto posizione centrale e rotazione del WA per analisi sperimentali e simulazioni Simulink

Capitolo 4

Modellizzazione del controllo e simulazione numerica

Dopo aver caratterizzato a livello sperimentale il galleggiante si vuole modellizzare il sistema di controllo al fine di ottimizzare le condizioni operative. Nella progettazione di nuovi sistemi di produzione di energia elettrica uno degli aspetti primari da considerare è il Levelised Cost Of Energy (LCOE), il quale va poi a definire se la nuova tecnologia sviluppata può essere competitiva a livello di costi di produzione nel mercato elettrico. Si ha allora interesse nel massimizzare la potenza generata dal dispositivo nelle condizioni di utilizzo.

In particolare verranno prima descritte le basi teoriche per il controllo. Verrà quindi analizzata la condizione di risonanza tale da massimizzare la potenza. Data l'incertezza su determinati parametri di modellizzazione verrà applicato l'algoritmo di Hooke e Jeeves per implementare il Maximum Power Point Tracker (MPPT) al fine di aggiustare le condizioni operative a quelle di ottimo. Infine, verranno effettuate delle simulazioni numeriche attraverso modello Simulink.

4.1 Basi teoriche per il controllo

Consideriamo nuovamente l'equazione di Cummins nel Capitolo 2 nel dominio della frequenza per 1 DOF:

$$F_{pto}(\omega) + F_{ex}(\omega) = \left[\left(B(\omega) + B_V(\omega) \right) + j \left(\omega(M + A(\omega)) + \frac{C}{\omega} \right) \right] \dot{\xi}(\omega)$$

La forza esercitata dal PTO $F_{pto}(\omega)$ può essere scomposta nelle sue componenti proporzionali a posizione, velocità e accelerazione tale per cui:

$$F_{pto}(\omega) = C_{pto} \cdot \xi(\omega) + B_{pto} \cdot \dot{\xi}(\omega) + I_{pto} \cdot \ddot{\xi}(\omega) \quad (4.1)$$

Inserendo allora la $F_{pto}(\omega)$ così definita all'interno dell'Equazione (4.1) otteniamo:

$$F_{ex}(\omega) = \left[\left(B(\omega) + B_V(\omega) + B_{pto} \right) + j \left(\omega(M + A(\omega) + I_{pto}) + \left(\frac{C + C_{pto}}{\omega} \right) \right) \right] \dot{\xi}(\omega)$$

dalla quale si può facilmente ricavare la velocità verticale del dispositivo:

$$\dot{\xi}(\omega) = \frac{F_{ex}(\omega)}{\left[\left(B(\omega) + B_V(\omega) + B_{pto} \right) + j \left(\omega(M + A(\omega) + I_{pto}) + \left(\frac{C + C_{pto}}{\omega} \right) \right) \right]} \quad (4.2)$$

4.1.1 Definizione delle condizioni di risonanza

Come criterio di controllo si vuole ottenere massima potenza generata. Tuttavia, affinché la ricerca delle condizioni di massimo non siano eccessivamente lunghe a livello temporale, conviene supporre di partire già dall'inizio in una condizione di regime prossima a quella di risonanza. Si andranno quindi a definire i parametri dell'attuatore che vanno a caratterizzare la F_{pto} , tali da garantire la condizione ottimale.

Considerando l'Equazione (4.2), per porsi in condizioni di risonanza, quindi di massima oscillazione, dobbiamo minimizzare il denominatore annullando la componente immaginaria [15]. Si è allora deciso di andare ad effettuare un controllo dove $I_{pto} = 0$, ovvero senza termine proporzionale all'accelerazione. L'annullamento della componente immaginaria del denominatore si traduce allora nella condizione:

$$C_{pto} = \omega^2(M + A(\omega)) - C \quad (4.3)$$

È quindi possibile andare a riscrivere l'equazione di $\dot{\xi}(\omega)$ come:

$$\dot{\xi}(\omega) = \frac{F_{ex}(\omega)}{B(\omega) + B_V(\omega) + B_{pto}} \quad (4.4)$$

Come secondo step vogliamo massimizzare la potenza generata. È possibile allora definire la potenza come valore mediato del prodotto fra la $F_{pto}(\omega)$ e la velocità $\dot{\xi}(\omega)$ per definizione. Si osserva però che valutando il valor medio di potenza è il solo termine B_{pto} legato alla velocità della $F_{pto}(\omega)$ a dare

CAPITOLO 4. MODELLIZZAZIONE DEL CONTROLLO E
SIMULAZIONE NUMERICA

un contributo. La posizione è infatti sfasata di 90° rispetto alla velocità, andando ad annullarsi nel periodo. Andiamo allora a definire la potenza nel seguente modo:

$$\begin{aligned}
 \langle P_{PTO}(\omega) \rangle &= \langle [F_{pto}(\omega)] \cdot \dot{\xi}(\omega) \rangle \\
 &= \langle [C_{pto}\xi(\omega) + B_{pto}\dot{\xi}(\omega)] \cdot \dot{\xi}(\omega) \rangle \\
 &= \langle B_{pto} \cdot \dot{\xi}^2(\omega) \rangle \\
 &= \frac{1}{2} B_{pto} \cdot |\dot{\xi}^2(\omega)| \\
 &= \frac{1}{2} B_{pto} \cdot \frac{F_{ex}^2(\omega)}{\left(B(\omega) + B_V(\omega) + B_{pto} \right)^2}
 \end{aligned}$$

Si può allora andare a valutare il massimo derivando rispetto a B_{pto} :

$$\frac{\partial \langle P_{PTO}(\omega) \rangle}{\partial B_{pto}} = \frac{\partial}{\partial B_{pto}} \left[\frac{B_{pto} \cdot F_{ex}^2(\omega)}{2 \cdot \left(B(\omega) + B_V(\omega) + B_{pto} \right)^2} \right] = 0$$

Attraverso semplici passaggi di derivazione si va ad ottenere il valore di B_{pto} , tale da garantire massima potenza, pari alla somma del damping factor e del coefficiente di attrito viscoso.

Ne risulta infine la seguente imposizione dei parametri del PTO:

$$\begin{cases} C_{pto} = \omega^2(M + A(\omega)) - C; \\ B_{pto} = B(\omega) + B_V(\omega) \\ I_{pto} = 0 \end{cases}$$

Inserendo quanto ottenuto all'interno dell'Equazione 4.5 otteniamo le condizioni di risonanza [25]:

$$\dot{\xi}_{OPT}(\omega) = \frac{F_{ex}(\omega)}{2 \cdot \left(B(\omega) + B_V(\omega) \right)} \quad (4.5)$$

dove si osserva la sola dipendenza dai parametri di Damping e attriti con una velocità imposta in fase con la forza di eccitazione rilevata.

Per ottenere la potenza massima poniamo i valori di controllo all'interno dell'equazione della $\langle P_{PTO}(\omega) \rangle$ ottenendo:

$$P_{MAX} = \frac{F_{ex}^2(\omega)}{8 \cdot B_{pto}} \quad (4.6)$$

4.1.2 Applicazione dell'algoritmo MPPT

Applicate le condizioni di risonanza al WEC si dovrebbero ottenere massimi guadagni di potenza secondo considerazioni teorica. Tuttavia, durante tutta l'analisi sperimentale effettuata nei capitoli precedenti, si è osservata la grande difficoltà nell'andare a definire i coefficienti idrodinamici in maniera univoca per i due gradi di libertà. Risulta inoltre importante considerare che le caratteristiche di un dispositivo in mare vanno a modificarsi molto velocemente per diversi motivi: interazione con agenti esterni come possono essere le alghe o depositi di molluschi nella superficie del WEC, variazioni negli attriti interni del dispositivo, erosioni e molto altro.

Per questi motivi si è scelto di sviluppare il controllo oltre le sole condizioni di risonanza attraverso un algoritmo di MPPT. Tale acronimo corrisponde alla denominazione "Maximum Power Point Tracker" e sta ad indicare una strategia di controllo diffusamente utilizzata per risorse rinnovabili come eolico e fotovoltaico. Come si può facilmente intuire dal nome si ha come obiettivo la massimizzazione della potenza generata al modificarsi delle condizioni ambientali. In particolare, a partire dai requisiti di risonanza rilevati dalla modellistica del sistema, si va a perturbare le condizioni operative in maniera continua valutando se questo vada a definire miglioramenti o peggioramenti nella potenza recuperata, aumentando la velocità di risposta a possibili variazioni ambientali e garantendo migliori efficienze.

A partire dalla definizione data della $F_{pto}(\omega)$ si ha dipendenza nel funzionamento rispetto a due parametri: C_{pto} proporzionale alla posizione e B_{pto} alla velocità. In tale modo ci è possibile definire la $F_{pto}(\omega)$ come:

$$F_{pto}(\omega) = C_{pto} \cdot \xi(\omega) + B_{pto} \cdot \dot{\xi}(\omega) \quad (4.7)$$

Come visto precedentemente essendo la potenza definita come prodotto fra la forza all'attuatore e la velocità, anch'essa sarà funzione dei parametri C_{pto} e B_{pto} . A partire da queste condizioni, al fine di massimizzare la potenza, viene allora utilizzato l' **algoritmo di ottimizzazione di Hooke e Jeeves**. Tale algoritmo si propone di ottenere condizioni di ottimo tramite un numero di passi finiti e presenta le seguenti caratteristiche:

- si tratta di un algoritmo "pattern-search" effettuando quindi ricerca diretta;
- non applica derivazioni (derivative-free) riducendo la complessità computazionale;
- è del tipo black-box, ovvero non si richiede che la funzione obiettivo sia nota a priori.

CAPITOLO 4. MODELLIZZAZIONE DEL CONTROLLO E
SIMULAZIONE NUMERICA

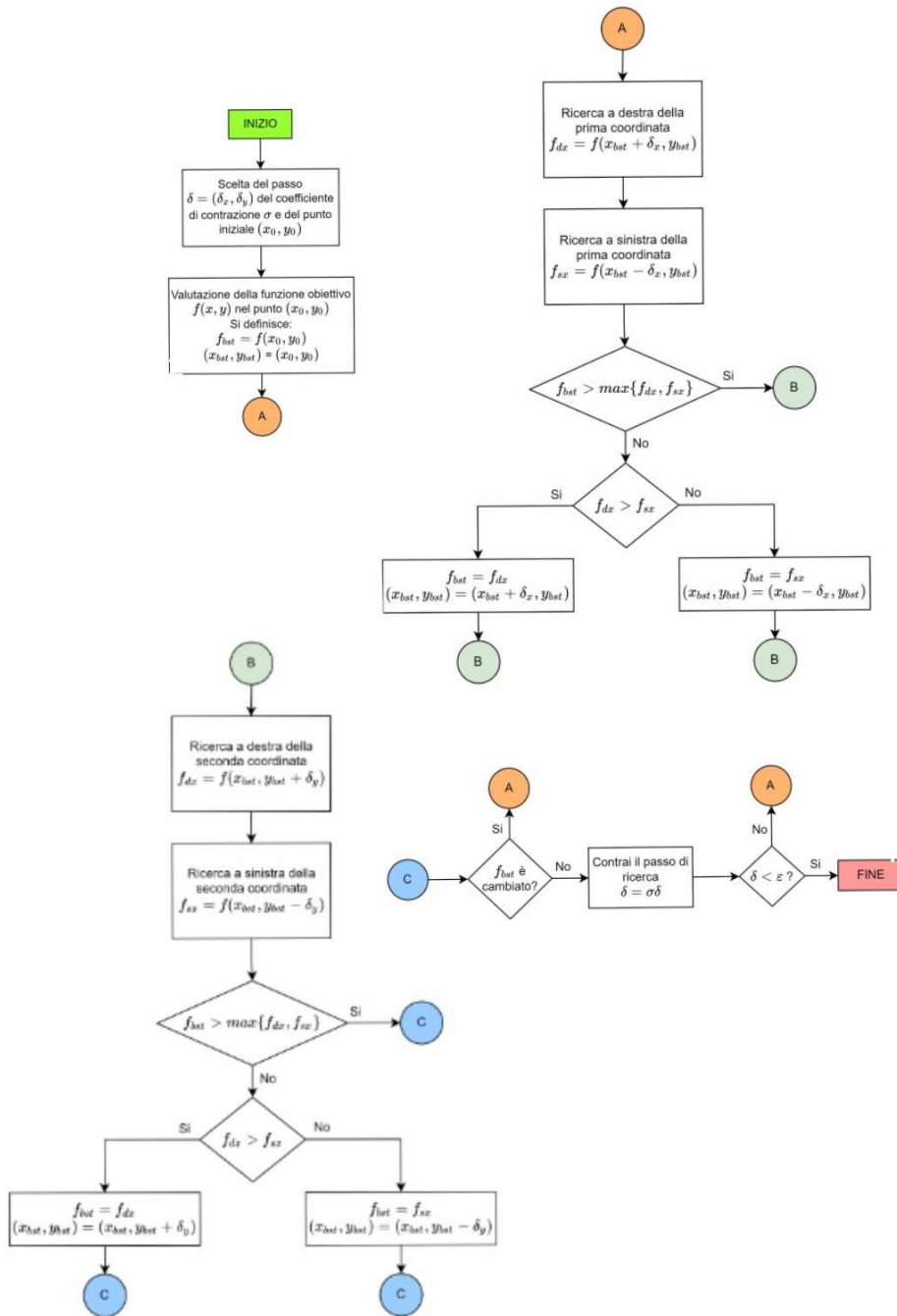


Figura 4.1: Flow-chart dell'algoritmo di ottimizzazione di Hooke e Jeeves

L'algoritmo è descritto dal flow-chart di Figura 4.1. Nel caso considerato si fa riferimento ad una funzione obiettivo a due variabili $f(x, y)$, $\delta_{x,y}$ indica il passo di ricerca, $\sigma_{x,y}$ il coefficiente di contrazione mentre $\epsilon_{x,y}$ rappresenta la soglia minima del passo di ricerca. In pratica, con tale algoritmo si vanno a modificare i parametri che vanno poi a definire la potenza, valutando in quali situazioni si ottenga un miglioramento. Nel caso si raggiunga una situazione in cui non è possibile ottenere alcun miglioramento, viene ridotto il passo mediante il coefficiente di contrazione $\sigma_{x,y}$. La ricerca continuerà quindi a procedere nella direzione che consente di aumentare la potenza con passi sempre più ridotti, per arrestarsi al raggiungimento di una soglia prestabilita (minimo spostamento o minima variazione della potenza).

4.2 Simulazione numerica dell'algoritmo MPPT

Al fine di dimensionare al meglio i parametri di controllo dell'algoritmo di Hooke-Jeeves prima di effettuare i test in vasca è stata effettuata una simulazione in ambiente Simulink, verificandone quindi l'efficacia.

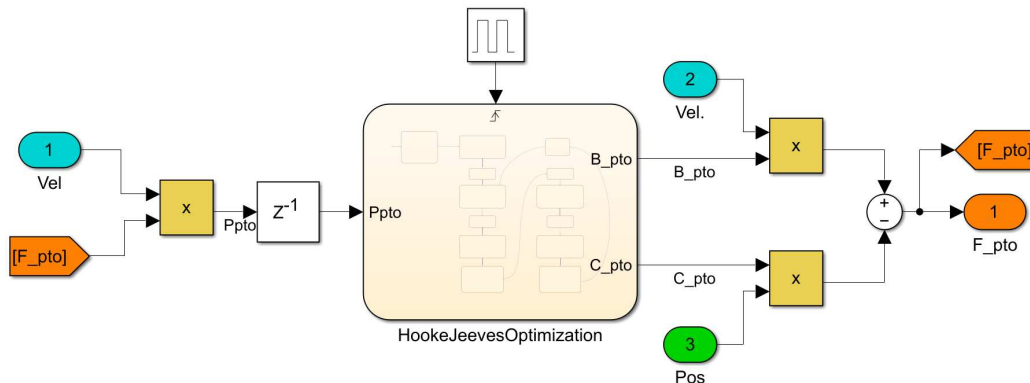


Figura 4.2: Modello Simulink del sistema di controllo

Rimandando a [9] per un'analisi più completa di questo specifico tema, nella sezione a seguire viene illustrata l'implementazione dell'algoritmo di controllo in Simulink per il modello del sistema presentato nel Capitolo 3, i cui parametri sono stati derivati dalle prove sperimentali. Verranno allora mostrati i risultati della simulazione i quali saranno poi confrontati con quelli relativi alle prove in vasca.

Il modello Simulink per la parte di controllo è presentato in Figura 4.2, dove si hanno in ingresso posizione e velocità del WEC. In funzione dei parametri C_{pto} e B_{pto} del PTO (proporzionali a posizione e velocità) è possibile

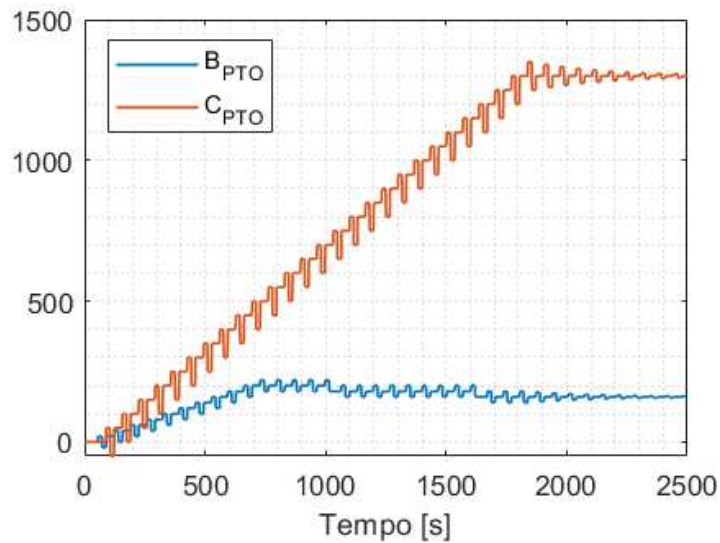


Figura 4.3: Modifica iterativa dei parametri di controllo MPPT

quindi andare a definire la forza applicata al PTO. Conoscendo quest'ultima è immediato ricavarsi la potenza istantanea la quale funge da input per lo stesso algoritmo di Hooke-Jeeves.

Sono state effettuate diverse simulazioni alle possibili condizioni operative per andare a verificare per via numerica quali fossero i coefficienti tali da permettere l'ottenimento di massima potenza generata. Vengono riportati in Figura 4.3 e 4.4 i risultati ottenuti da prova con elevazione d'onda parti a $0,3\text{ m}$ e periodo di 1 s .

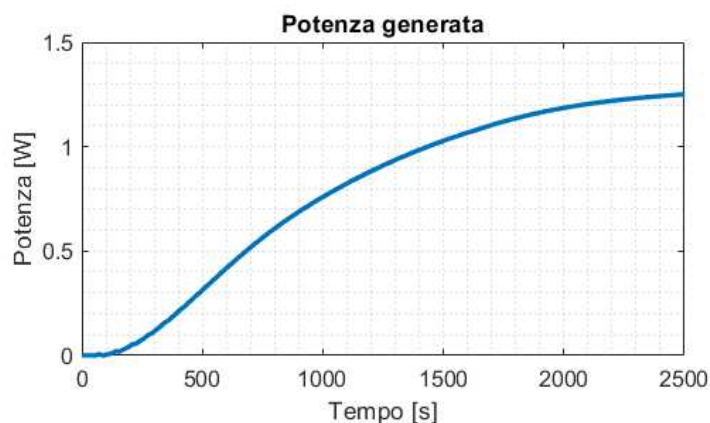


Figura 4.4: Valore efficace della potenza generata al PTO

Si può allora osservare come, a partire da valori di B_{PTO} e C_{PTO} nulli si vada ad effettuare una modifica progressiva arrivando alle condizioni di regime con massima potenza generata. Risulta immediato osservare che, imponendo valori iniziali nulli dei parametri di controllo, le condizioni a regime vengono ottenute in tempi molto lunghi, durante il quale le condizioni di moto ondoso potrebbero facilmente andare a modificarsi. Risulta quindi importante andare a imporre già in un primo momento condizioni che siano prossime a quelle ottimali di funzionamento, dovendo però conoscere quali siano le caratteristiche idrodinamiche del galleggiante e dell'onda incidente. Obiettivo della fase sperimentale è di verificare il corretto funzionamento dell'algoritmo di controllo, permettendo di andare ad adattare il movimento al PTO in maniera adattiva alle condizioni di moto ondoso, in tempi molto inferiori.

Capitolo 5

Implementazione e validazione sperimentale del sistema di controllo

Obiettivo finale delle analisi effettuate consiste nell'investigare la fase sperimentale di controllo sull'attuatore al fine di ottenere massima potenza estratta al PTO. La difficoltà principale consiste nell'effettuare il controllo del frangiflutti con moto a 2 gradi di libertà attraverso un PTO con azione sulla sola componente di movimento verticale. Inoltre l'attuatore è posto su una delle due estremità del galleggiante, la parte non vincolata. Sarà allora necessario riportare i parametri di controllo a tale posizione di modo da garantire condizioni di risonanza. Infine, mentre nel modello Simulink presentato nel Capitolo 4 è stato effettuato un controllo direttamente in forza, tale operazione non può essere impostata all'attuatore. Risulta allora necessario comprendere quali siano le condizioni da imporre al dispositivo attraverso un controllo in velocità tali da garantire l'imposizione dei parametri di forza funzionali per ottenere condizioni di risonanza.

Nel presente Capitolo in un primo momento verranno indagate le basi teoriche per effettuare il controllo con attuatore lineare di un sistema a 2 DOF. Andranno poi analizzati i risultati analitici tali da garantire le impostazioni di velocità ottimale per porsi in risonanza. Dopo aver descritto la componente di software tali da permettere le prove sperimentali verranno mostrati i risultati ottenuti, effettuando delle analisi sui rendimenti alle diverse condizioni operative.

5.1 Analisi teorica dei parametri di controllo

Nel precedente capitolo sono stati definiti i parametri ottimali di controllo al PTO tali per cui

$$F_{pto}(\omega) = C_{pto} \cdot \xi(\omega) + B_{pto} \cdot \dot{\xi}(\omega) \quad (5.1)$$

Volendo avere una formulazione più sintetica definiamo entrambe le grandezze in funzione della velocità:

$$F_{pto}(\omega) = \left[B_{pto} - \frac{C_{pto}}{\omega} \right] \cdot \dot{\xi}(\omega) \quad (5.2)$$

dove la parte fra parentesi sta ad indicare l' **impedenza del PTO** Z_{pto} di modo che $F_{pto}(\omega) = Z_{pto} \cdot \dot{\xi}(\omega)$.

Indicando $\xi'_{pto} = -\xi_{pto}$ e $\varphi'_{pto} = -\varphi_{pto}$ è possibile riscrivere l'Equazione di Cummins nel dominio della frequenza a 2 DOF nel seguente modo:

$$\begin{bmatrix} F_{ex}(\omega) \\ M_{ex}(\omega) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{buoy11} & 0 \\ 0 & Z_{buoy22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{\xi}(\omega) \\ \dot{\varphi}(\omega) \end{bmatrix} + Z_{pto} \cdot \begin{bmatrix} \xi'_{pto}(\omega) \\ \varphi'_{pto}(\omega) \end{bmatrix}$$

Ricordando che siamo nell'ipotesi di piccoli spostamenti, sia $B = 40 \text{ cm}$ la larghezza del galleggiante, si ha $\varphi'_{pto}(\omega) = \frac{B}{2} \cdot \xi'_{pto}(\omega)$. L'espressione può quindi essere scomposta in due equazioni riferite ai 2 DOF:

$$\begin{cases} F_{ex}(\omega) = Z_{buoy11} \cdot \dot{\xi}(\omega) + Z_{pto} \cdot \xi'_{pto}(\omega) \\ M_{ex}(\omega) = Z_{buoy22} \cdot \dot{\varphi}(\omega) + Z_{pto} \cdot \frac{B}{2} \xi'_{pto}(\omega) \end{cases}$$

Invertiamo le quazioni suscritte in funzione di $\dot{\xi}(\omega)$ e $\dot{\varphi}(\omega)$.

$$\begin{cases} \dot{\xi}(\omega) = \frac{1}{Z_{buoy11}} [F_{ex}(\omega) - Z_{pto} \cdot \xi'_{pto}(\omega)] \\ \dot{\varphi}(\omega) = \frac{1}{Z_{buoy22}} [M_{ex}(\omega) - Z_{pto} \cdot \frac{B}{2} \xi'_{pto}(\omega)] \end{cases}$$

È possibile allora correlare la velocità al PTO rispetto a velocità verticale al centro del WA e la sua velocità angolare.

$$\begin{aligned} \xi'_{pto}(\omega) &= \dot{\xi}(\omega) + \frac{B}{2} \cdot \dot{\varphi}(\omega) \\ &= \frac{F_{ex}(\omega) - Z_{pto} \cdot \xi'_{pto}(\omega)}{Z_{buoy11}} + \frac{B}{2} \cdot \frac{M_{ex}(\omega) - Z_{pto} \cdot \frac{B}{2} \xi'_{pto}(\omega)}{Z_{buoy22}} \end{aligned}$$

Effettuando semplici passaggi algebrici si ottiene la funzione di velocità ottimale da imporre al PTO:

$$\dot{\xi}'_{pto}(\omega) = \left[1 + \frac{Z_{pto}}{Z_{buoy,11}} + \left(\frac{B}{2} \right)^2 \cdot \frac{Z_{pto}}{Z_{buoy,22}} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{F_{ex}}{Z_{buoy,11}} + \frac{B}{2} \cdot \frac{M_{ex}}{Z_{buoy,22}} \right]$$

Al PTO sarà allora necessario andare ad imporre la velocità suscritta, in componente reale ed immaginaria, al fine di porsi in condizioni di risonanza attraverso controllo all'attuatore.

5.1.1 Analisi numerica preliminare

Attraverso algoritmo su Matlab sono stati sviluppate delle simulazioni in frequenza in grado di definire le condizioni di ottimo in maniera più generica per tutte le possibili prove. In particolare, a partire dai coefficienti idrodinamici ottenuti nel corso della prima analisi sperimentale, data una certa frequenza è stata effettuata una simulazione ad un range variabile di fattori B_{pto} e C_{pto} .

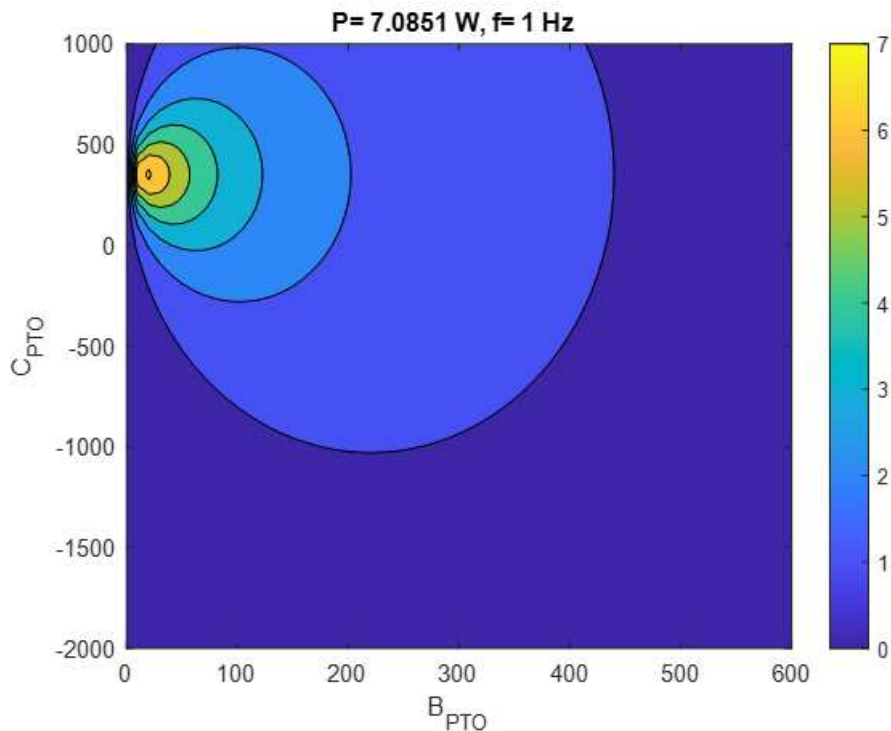


Figura 5.1: Potenza estratta in funzione dell'impedenza del PTO [16]

A partire da questi è allora stata definita la dinamica del dispositivo valutandone la potenza generata. Attraverso il contour in Figura 5.1 è possibile osservare i valori ottenuti per un caso di onda ad altezza $H = 1\text{ m}$ e frequenza $f = 1\text{ Hz}$. Dalla Figura è immediato osservare quanto sia importante effettuare un controllo rigoroso al fine di permettere una buona resa energetica.

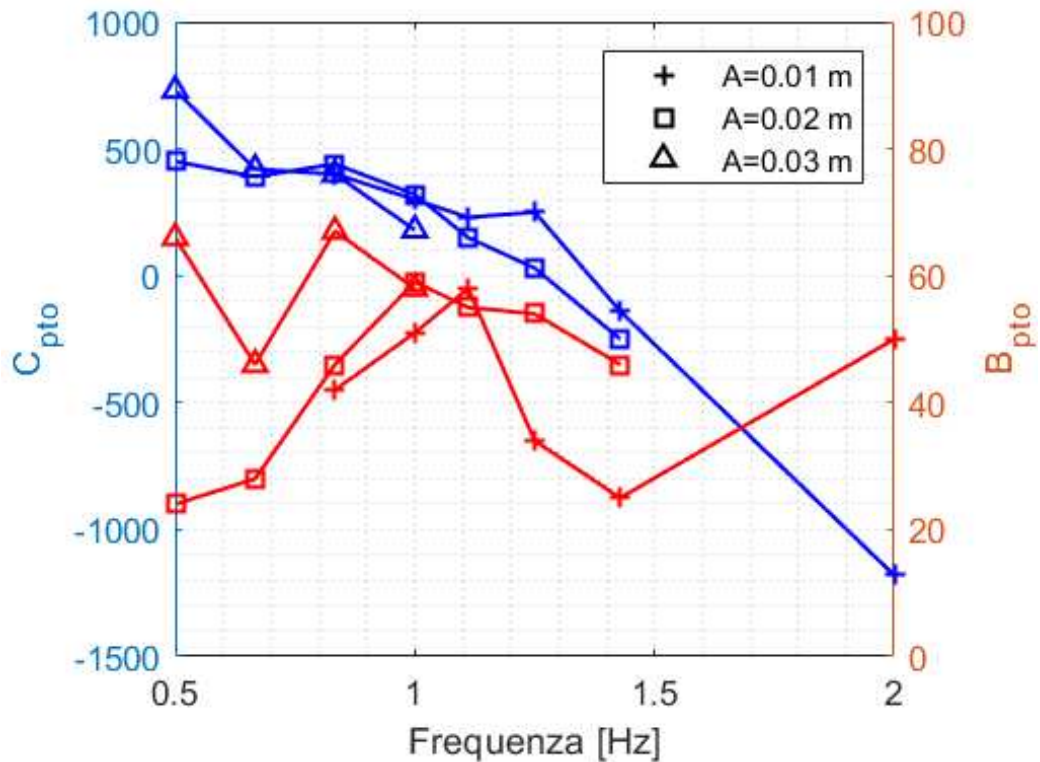


Figura 5.2: Parametri dell'impedenza del PTO in funzione della frequenza [16]

La stessa simulazione è stata poi eseguita per il range di frequenze e altezze d'onda utilizzate nelle prove di caratterizzazione del Capitolo 3 ottenendo gli andamenti di C_{pto} e B_{pto} ottimali per tutte le condizioni operative studiate. È possibile osservare l'andamento dei parametri dell'impedenza del PTO in Figura 5.2.

Al fine di effettuare un controllo in velocità e non in forza (funzione appunto di C_{pto} e B_{pto}) è stato necessario determinare allo stesso modo la velocità $\dot{\xi}_{pto}(\omega)$ al PTO esprimendola in modulo e fase rispetto alla forza di eccitazione F_{ex} . I risultati ottenuti sono presentati in Figura 5.3 e 5.4.

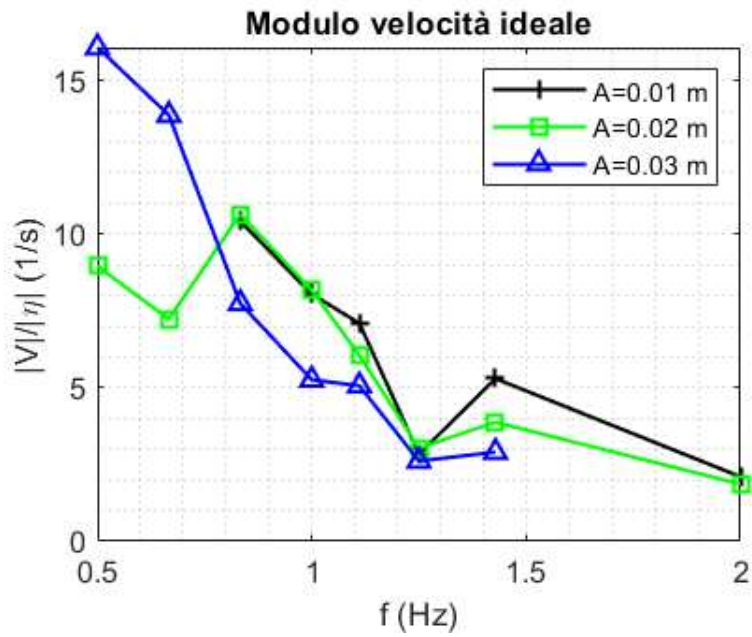


Figura 5.3: Modulo della velocità ideale per ottenere condizioni di risonanza, normalizzato all'elevazione d'onda, in funzione della frequenza [16]

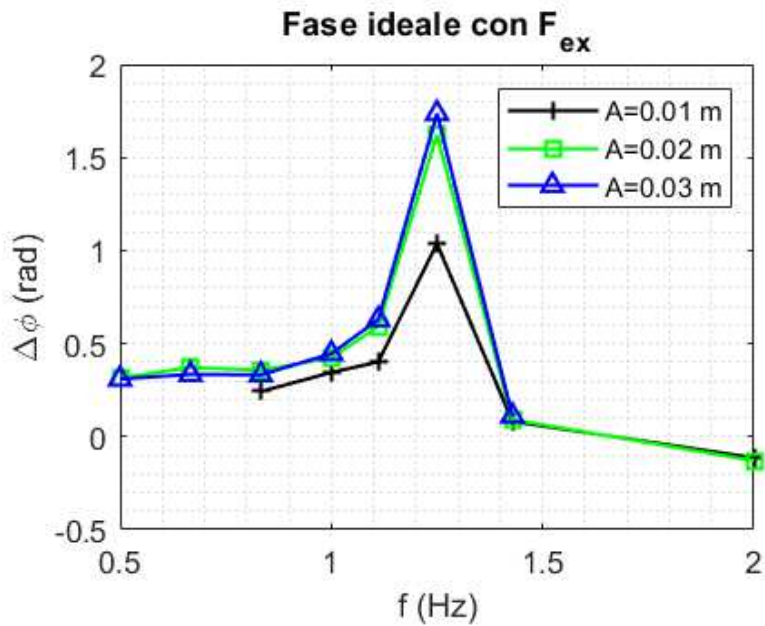


Figura 5.4: Differenza di fase fra la velocità imposta al PTO e la forza di eccitazione, in funzione della frequenza [16]

A partire dalla conoscenza della massima potenza estraibile definita come:

$$P_{MAX} = \frac{F_{ex}^2(\omega)}{8B_{pto}} \quad (5.3)$$

è possibile valutare l'efficienza teorica rispetto alle prove effettuate. In Figura 5.5 sono allora riportati gli andamenti.

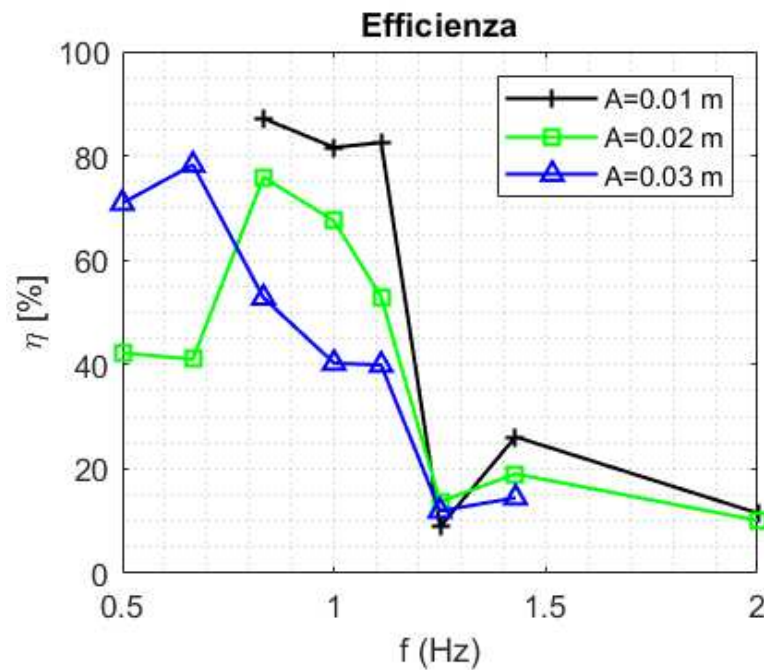


Figura 5.5: Efficienza al PTO in funzione della frequenza [16]

Come ultimo parametro preliminare è possibile andare a determinare la fase fra la velocità imposta al PTO e, diversamente da prima in cui si considerava la F_{ex} , la fase della forza rilevata al PTO stesso. Si ricorda che, secondo l'Equazione di Cummins:

$$F_{pto}(\omega) = Z_{pto} \cdot \dot{\xi}(\omega) - F_{ex}(\omega) \quad (5.4)$$

Tale parametro, più che essere utile per l'impostazione della fase preliminare al controllo, verrà utilizzato nella fase di post-processing per verificare che le condizioni ottenute vadano effettivamente ad avvicinarsi a quelle di risonanza. Si può osservare l'andamento, sempre per la stessa casistica di prove del Capitolo 3, in Figura 5.6.

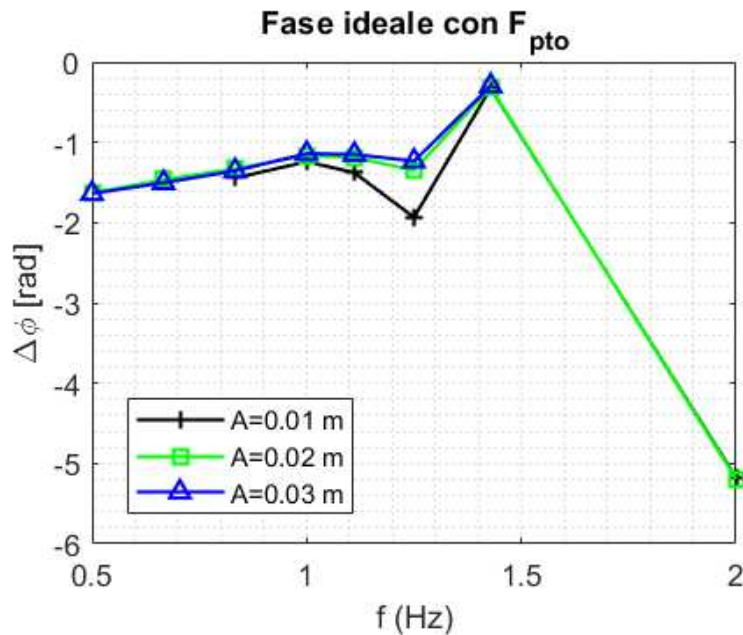


Figura 5.6: Differenza di fase fra la velocità imposta al PTO e la forza rilevata dal PTO stesso, in funzione della frequenza [16]

5.2 Validazione sperimentale

Trattiamo allora la fase sperimentale per validare il sistema di controllo MPPT del WA. Il software utilizzato per il controllo stesso è stato nuovamente Sysmac Studio. In particolare dopo aver calibrato i vari parametri attraverso l'analisi numerica in Simulink è stato scaricato il blocco preposto alla simulazione dell'algoritmo di Hooke e Jeeves in forma di testo strutturato, importandolo direttamente in Sysmac Studio. Il programma è stato poi modificato di modo da poter garantire l'imposizione delle condizioni di risonanza all'avvio. Verranno allora elencate a seguire le fasi preliminari alle prove sperimentali.

A partire dal modulo della velocità ottimale e dalla fase con la F_{ex} per la prova specifica (in Figura 5.3 e 5.4) si vanno a definire le due componenti di velocità A e B tali per cui:

$$\dot{\xi}_{pto} = A \cdot \sin(\omega t) + B \cdot \cos(\omega t) \quad (5.5)$$

Essendo più immediato effettuare un controllo in posizione in Sysmac Studio, si è impostato quindi ξ_{pto} , ricavato dalla (5.6) per integrazione::

$$\xi_{pto} = -\frac{A}{\omega} \cdot \cos(\omega t) + \frac{B}{\omega} \cdot \sin(\omega t) \quad (5.6)$$

Come ingressi al modulo di input del PLC sono stati posti i segnali dei trasduttori di posizione alle due estremità del galleggiante, il trigger per andare a sincronizzare i segnali rilevati da Sysmac con quelli delle sonde di onda elaborati esternamente e infine la cella di carico. Quest'ultima, nella prima fase della prova con galleggiante bloccato, è in grado di rilevare la forza di eccitazione. Non essendo bloccata l'altra estremità del PTO, il modulo della F_{ex} rilevata non risulta attendibile, ma viene comunque utilizzato per definirne la fase. Si ha allora che, nel passaggio della forza da positiva a negativa, quindi da trazione della cella di carico a compressione, si impone l'avvio del movimento ξ_{pto} alla stessa frequenza dell'onda incidente. Si ha però che, imponendo questa esatta condizione, per $t = 0$, si avrebbe uno scatto repentino del galleggiante nella fase iniziale per portarsi nella posizione desiderata ($\xi_{pto0} = \frac{A}{\omega}$), con possibili problematiche strutturali. Tale problematica è esemplificata dagli andamenti di Figura 5.7.

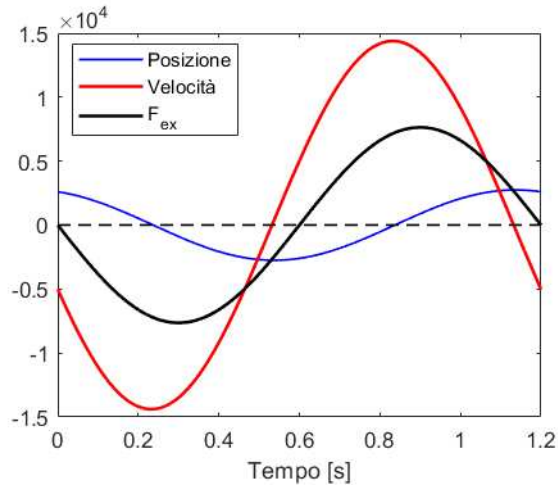


Figura 5.7: Esempio di posizione, velocità e forza di eccitazione nella fase iniziale della prova sperimentale

Al fine di ovviare a tale comportamento, in seguito alla rilevazione del passaggio della forza di eccitazione da negativa a positiva, è necessario aspettare l'attivazione del movimento del PTO per il tempo Δt tale da avere passaggio della posizione per zero. La velocità andrà velocemente al valore di regime permettendo un funzionamento ottimale. Per ottenere il valore di Δt per ogni singola prova è necessario risolvere l'Equazione 5.6 per $\xi = 0$ ottenendo:

$$\Delta t = \frac{1}{\omega} \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{A}{B}\right) \quad (5.7)$$

I parametri in questo modo sono stati allora definiti al meglio potendo effettuare le prove in vasca.

5.2.1 Risultati sperimentali

Consideriamo ora la prova sperimentale di generazione con controllo MPPT effettuata per onda con elevazione $\eta = 0.02 \text{ m}$ e periodo $T = 1.2 \text{ s}$. Dalle analisi preliminari sulla velocità ottimale da imporre al PTO per ottenere condizioni di risonanza, nel nostro caso specifico, otteniamo $|\dot{\xi}'_{pto}/\eta| = 7.75 \text{ s}^{-1}$ e $\angle \dot{\xi}'_{pto} = 0.36 \text{ rad}$. Avendo fatto tali considerazioni è allora possibile definire i parametri di controllo:

$$\begin{cases} A = |\dot{\xi}'_{pto}/\eta| \cdot \eta \cdot \cos(\angle \dot{\xi}'_{pto}) = 15.13 \text{ cm/s}; \\ B = |\dot{\xi}'_{pto}/\eta| \cdot \eta \cdot \sin(\angle \dot{\xi}'_{pto}) = 5.18 \text{ cm/s} \\ \Delta t = \frac{1}{\omega} \cdot \arctan(A/B) = 237 \text{ ms} \end{cases}$$

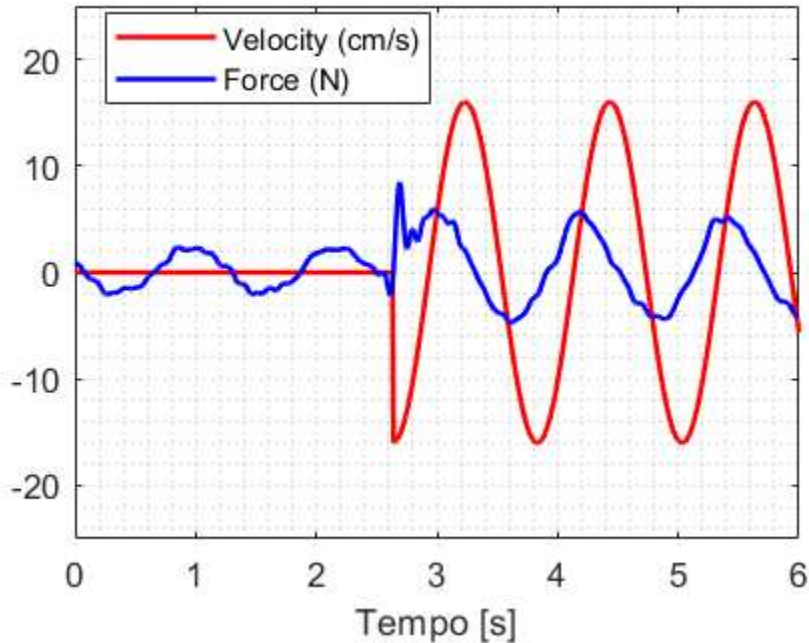


Figura 5.8: Velocità al PTO e forza rilevata all'avvio del movimento

Analizziamo in un primo momento l'avvio della prova presentato in Figura 5.8. Si osserva allora una prima fase con galleggiante fermo al PTO e rilevazione della forza di eccitazione. Al passaggio della forza da positiva a negativa, per i motivi prima illustrati, non si ha attivazione diretta dell'attuatore ma solamente dopo un intervallo Δt . Ne deriva poi una rapida fase di transitorio per poi imporre gli spostamenti richiesti. La cella di carico utilizzata per portare in input la forza al PLC presenta però un'elevata oscillazione dovuta a motivi meccanici (vibrazioni della struttura) ed elettromagnetici: il valore presentato in Figura è già stato filtrato per garantire una migliore rappresentazione. In tali condizioni risulta quasi impossibile andare a rilevare l'effettivo passaggio per lo zero della forza quindi il giusto Δt .

Effettuando poi una cross-correlazione fra i segnali di velocità e forza rilevata è stato possibile definire la fase Θ fra le due grandezze a livello sperimentale. Dalle analisi è stato ottenuto $\Theta_{sper} = 68^\circ$ a fronte di un valore teorico $\Theta_{th} = 76^\circ$ (vedi Figura 5.6).

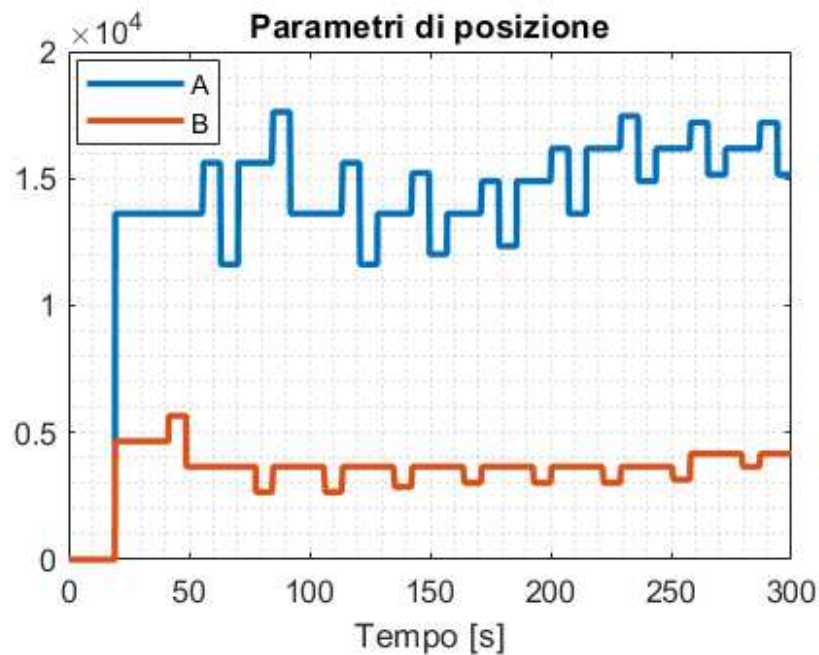


Figura 5.9: Variazione dei parametri di controllo MPPT della posizione in funzione del tempo

È poi possibile analizzare in maniera più dettagliata il controllo MPPT in Figura 5.9. Dopo una fase iniziale nella quale si ha galleggiante bloccato, come visto prima, si ha l'imposizione dei parametri A e B prima definiti. Segue quindi un intervallo di tempo di circa 15 secondi nel quale il sistema

CAPITOLO 5. IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL SISTEMA DI CONTROLLO

mantiene le condizioni teoriche di risonanza senza effettuare ulteriori valutazioni. Solo in un secondo momento inizia il controllo MPPT, andando a modificare ad intervalli regolari i parametri A e B valutando la potenza generata e ricercando le condizioni di ottimo. Dal grafico si può osservare come le condizioni iniziali poste fossero prossime a quelle ricavate poi a regime, con delle piccole variazioni che hanno permesso un incremento di potenza. Si può inoltre osservare come, raggiunte le condizioni di stabilità si vada ad accorciare il parametro σ indicante il passo di variabilità di A e B , di modo da avere una potenza il più possibile costante a regime. Il tempo necessario per portarsi a regime è stato di circa 6 minuti, di gran lunga inferiore a quanto ottenuto per via numerica e perfettamente conforme con le esigenze pratiche in mare aperto.

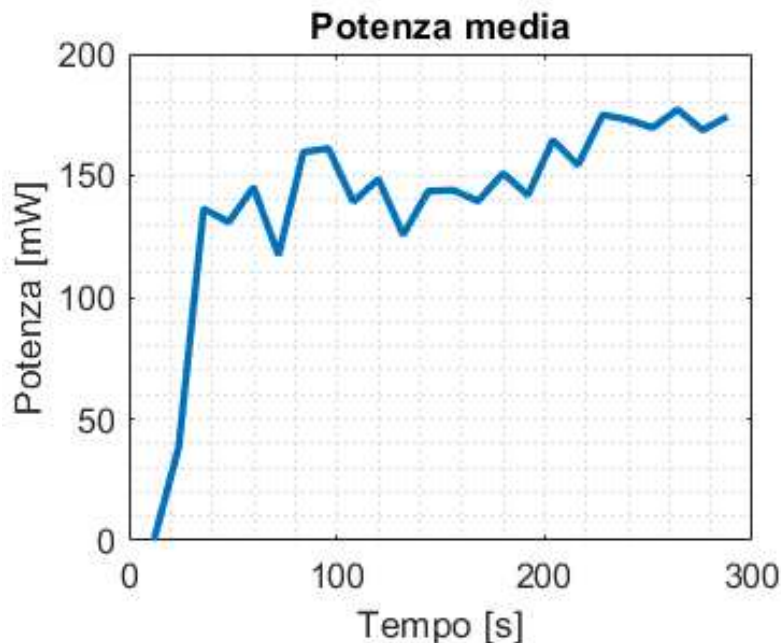


Figura 5.10: Valore medio di potenza generata durante il controllo MPPT

Infine, in Figura 5.10 è possibile analizzare il valore medio della potenza generata durante il controllo MPPT. Si possono nuovamente ritrovare gli andamenti prima illustrati: una prima fase in cui ci si pone in risonanza, una successiva ricerca del picco di potenza per arrivare infine a delle condizioni più stabili.

Si vuole valutare l'efficienza ottenuta nella prova effettuata. Al fine di definire la potenza in ingresso P_{in} risulta necessario definire il numero d'onda k , funzione del periodo T e dell'altezza del fondale della vasca $h = 0.6m$. In

seguito è allora possibile definire la celerità d'onda e a seguire la velocità di gruppo C_g con le formule a seguire:

$$\begin{cases} c = \frac{\omega}{k} \\ G = \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \\ C_g = \frac{c}{2} \cdot (1 + G) \end{cases}$$

Si può allora valutare la potenza dell'onda in ingresso come:

$$P_{in} = \rho \cdot g \cdot C_g \cdot \frac{H^2}{8} \quad (5.8)$$

Nella prova di analisi è stata ottenuta $P_{in} = 522mW$.

Si può poi definire quale sia la potenza trasmessa al WA attraverso la seguente formula (già dimostrata nel capitolo precedente):

$$P_{tr} = \frac{F_{ex}^2(\omega)}{8(B_\omega + B_V)} \quad (5.9)$$

dove prendiamo i parametri direttamente dai risultati numerici in NE-MOH ottenendo $P_{tr} = 253mW$.

Infine valutare la potenza estratta al PTO risulta immediato a partire dalle rilevazioni effettuate ottenendo, a regime, $P_{ex} = 195mW$.

Si può quindi valutare l'efficienza del controllo MPPT come rapporto fra la potenza estratta e quella trasmessa al WA ottenendo:

$$\eta = \frac{P_{ex}}{P_{tr}} = 80\% \quad (5.10)$$

Tale valore è perfettamente in accordo con le analisi teoriche, in base alle quali si era valutato un rendimento al 77 %.

È poi possibile definire il rendimento complessivo η' come rapporto fra la potenza estratta al PTO (come prima) e la potenza stessa dell'onda:

$$\eta' = \frac{P_{ex}}{P_{in}} = 37.3\% \quad (5.11)$$

Si ricorda che le prove sono state effettuate su un prototipo in scala 1:20. Per mezzo delle leggi di scala è possibile andare a prevedere quali sia l'effettiva generazione di potenza per il dispositivo non scalato. Alle dimensioni reali vanno a corrispondere un'elevazione d'onda di $H_R = 0.4 m$ con periodo pari a $T_R = 5.4 s$, dalle quali si andrebbe a generare una potenza totale di $P_{ex R} = 7 kW$.

CAPITOLO 5. IMPLEMENTAZIONE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DEL SISTEMA DI CONTROLLO

Sono state successivamente sviluppate le analisi a diverse condizioni operative al fine di validare il controllo in MPPT. I risultati ottenuti sono presentati in Figura 5.11. In particolare viene mostrato per ogni prova effettuata la fase fra velocità del PTO e forza rilevata dallo stesso a livello sperimentale e secondo previsioni teoriche, quindi il rendimento ottenuto e infine la potenza massima generata.

H [mm]	T [s]	FASE F-Vel (Val. teorico) [°]	η sperimentale (val. teorico) [%]	η' sperimentale	P_max [mW]	P_max scala reale[kW]
20	2	78 (93)	40 (42)	32.7	144	5.2
30	2					
20	1,5	64 (86)	89 (41)	49.5	230	8.2
30	1,5					
10	1,2	79 (77)	78 (88)	36.1	40	1.4
20	1,2	68 (76)	80 (77)	37.3	175	6.3
30	1,2	65 (75)	56 (54)	26	255	9.1
10	1	70 (70)	67 (83)	29.8	32	1.1
20	1	56 (68)	64 (67)	28.7	120	4.3
30	1	52 (67)	57 (40)	25.4	240	8.6
20	0,9	58 (65)	12 (53)	5.3	30	1.1
30	0,9	50 (66)	20 (40)	9.8	80	2.9
10	0,8	33 (108)	2 (10)	0.8	3	0.1
30	0,8	144 (66)	< 0 (15)	< 0	-10	< 0
20	0,5	176 (297)	< 0 (10)	< 0	-24	< 0

Figura 5.11: Tabella riassuntiva prove di controllo MPPT alle diverse condizioni operative

Nei casi di ampiezza dell'onda $H = 30 \text{ mm}$ e periodo $T = 2$ e $T = 1.5 \text{ s}$ si hanno valori da imporre di spostamento maggiori rispetto alla lunghezza della guida al PTO, rendendo impraticabile la sperimentazione.

Considerando le prove svolte si osservano comportamenti ottimali per periodi maggiori al secondo, in linea con le previsioni teoriche.

Si nota che il rendimento dell' 89%, a fronte del 41% teorico, per prova a $T = 1,5 \text{ s}$ e $H = 20 \text{ mm}$ è giustificato dal fatto che sono stati utilizzati i dati numerici ricavati da analisi BEM per la definizione della P_{tr} . Come visto nei capitoli precedenti questi sono soggetti ad errore rendendo necessarie ulteriori analisi per definire a livello sperimentale tale grandezza in maniera ottimale.

Infine si osserva che per periodi inferiori a $T = 0.8 \text{ s}$ si ha difficoltà nella produzione di energia. Il sistema non è in grado di entrare di porsi in risonanza causando l'impossibilità di generare potenza. Dovranno essere svolte ulteriori analisi per andare a definire al meglio come ottimizzare il controllo per alte frequenze.

Conclusioni

Nel presente elaborato in un primo momento è stata fornita una descrizione generica delle fonti rinnovabili ponendo particolare attenzione sulla generazione da moto ondoso. Sono state quindi presentate le premesse teoriche per comporre l'Equazione di Cummins per sistema a 1 DOF e 2 DOF nel dominio del tempo e della frequenza.

Attraverso analisi BEM su NEMOH sono stati definiti i coefficienti idrodinamici numericamente, per poi validare tali grandezze con le prove sperimentali di Radiazione, Eccitazione e a Galleggiamento Libero. Per effettuare il controllo del PTO è stato utilizzato un PLC della OMRON programmato per mezzo del software Sysmac Studio. Grazie ai risultati ottenuti è stato possibile costruire un modello matematico su Simulink tale da ricreare le condizioni operative della Prova a Galleggiamento Libero. I risultati mostrano una soddisfacente caratterizzazione del sistema, a confronto delle prove sperimentali, per quando riguarda l'elevazione del dispositivo, con però maggiore difficoltà nel ricreare la rotazione in maniera esatta. Saranno necessarie in futuro delle analisi sperimentali più specifiche sulla Forza e il Momento di Eccitazione al fine di ovviare a tale problematica.

Nella seconda fase di analisi si aveva come obiettivo la validazione del sistema di controllo MPPT per il dispositivo, andando quindi a definire a livello teorico le condizioni di risonanza. Data però l'incertezza nella valutazione dei coefficienti idrodinamici, soggetti inoltre a grande variabilità nel tempo a causa dei numerosi fattori esterni in ambiente marino, si è scelto di affiancare alla ricerca delle condizioni di risonanza il controllo di Hooke e Jeeves per massimizzare la potenza generata. È stato sviluppato in una prima fase un codice numerico, implementato all'interno del modello Simulink precedente creato, con l'obiettivo di validare l'algoritmo stesso e ottimizzare i parametri interni. Tale codice è stato poi importato in Sysmac Studio per poter poi effettuare delle prove di validazione sperimentale. Prima delle prove in vasca è stato necessario trasferire il controllo in forza applicato al centro del galleggiante, utilizzato nel sistema Simulink, ad un controllo in posizione con applicazione all'estremità non vincolata del WA, dove è stato

posto il PTO. Ottenuta la strategia di controllo ottimizzata per le condizioni in vasca è stato possibile effettuare le prove sperimentali a diverse condizioni operative. I risultati mostrano efficienze simili a quelle teoriche per periodi d'onda maggiori di $T = 0.9$ s, ponendo in un primo momento il sistema in risonanza per poi andare a ricavare il massimo di potenza attraverso l'algoritmo di MPPT. Per frequenze elevate si è invece rilevata una forte difficoltà a garantire generazione da moto ondosso. Saranno necessarie in futuro ulteriori analisi per ottimizzare il controllo anche in queste condizioni.

Come sviluppi futuri, oltre ad una più completa analisi della Prova di Eccitazione e l'ottimizzazione del controllo MPPT per frequenze elevate come illustrato precedentemente, risulta necessario estendere le prove effettuate al caso di onde irregolari. La difficoltà primaria consiste nell'andare a definire la frequenza di picco attraverso il PLC per via automatica, adattando i coefficienti di controllo a questa situazione. A fronte dei risultati sperimentali ottenuti è inoltre possibile andare a effettuare una migliore calibrazione dei parametri di controllo ottenendo convergenza in tempi più rapidi. Inoltre, si ha come obiettivo di permettere al sistema di adattarsi dinamicamente a condizioni operative variabili nel corso del tempo. Questo implica la necessità di effettuare una stima della forza di eccitazione a partire dalle rilevazioni fatte durante il movimento del PTO, collegandosi ciclicamente al modello numerico dell'attuatore, per garantire condizioni ottimali di moto e quindi di generazione. E' infine oltremodo importante definire l'efficacia di tale apparato come WA, verificando di quanto si discostino le condizioni di massima potenza generata rispetto a quelle di massima attenuazione.

L'auspicio è che le analisi effettuate in questo progetto di tesi possano essere utili per lo sviluppo di questa tecnologia complementare a strutture già costruite e con potenzialità definite in funzione delle specificità della conformazione marina della costiera italiana.

Bibliografia

- [1] AGENCY, I. E. Energy supply, electricity generation by source. <https://www.iea.org> [Online, 2022].
- [2] BACELLI, G., COE, R. G., PATTERSON, D., AND WILSON, D. System identification of a heaving point absorber: Design of experiment and device modeling. *Energies* (2017).
- [3] BRACEWELL, R., AND KAHN, P. B. The fourier transform and its applications. *American Journal of Physics* (1966).
- [4] BRITISH, P., ET AL. Statistical review of world energy 2017.
- [5] CAIAFFA, EMANELA SANNINO, G. B. A. C. Energia dal mare: modelli numerici e gis per la valutazione del potenziale energetico. *GEOMedia* (2011).
- [6] CAVALLI, L., ALIBEGOVIC, M., CRUICKSHANK, E., FARNIA, L., ROMANI, I. G., AND SANNA, S. The contribution of pnrr investments to the 2030 agenda in light of the european commission's assessment. *FEEM Policy Brief* (2021).
- [7] CENTRE/BNEF, F. S. Global trends in renewable energy investment 2017. <http://resourceirena.irena.org/gateway/dashboard/> [Online, 2017].
- [8] CZECH, B., AND BAUER, P. Wave energy converter concepts: Design challenges and classification. *IEEE Industrial Electronics Magazine* (2012).
- [9] EMANUELE LAX, MAURO ANDRIOLLO, A. T. Modello dinamico per il controllo di un attenuatore del moto ondoso con cogenerazione di energia elettrica (2022).
- [10] EMEC. Classification of the main developed wave energy converter. <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-devices> [Online, 2020].

-
- [11] INGEMAR. Frangionde galleggianti, struttura e caratteristiche tecniche. <http://www.ingemar.it/it/prodotti-servizi/> [Online, 2020].
- [12] KAVLAK, G., MCNERNEY, J., AND TRANCIK, J. E. Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. *Energy policy* (2018).
- [13] KORDE, U. A., AND RINGWOOD, J. *Hydrodynamic control of wave energy devices*. Cambridge University Press, 2016.
- [14] LHEEA. Nemoh presentation. <https://lheea.ec-nantes.fr/> [Online, 2017].
- [15] LI, D., AND PATTON, R. Model predictive energy-maximising tracking control for a wavestar-prototype wave energy converter. *Journal of Marine Science and Engineering* (2023).
- [16] LUCA MARTINELLI, GIULIO CAPOVILLA, M. V. P. R. C. F. E. L. M. A. Experimental investigation of a hybrid device combining a wave-energy-converter and a floating-breakwater in a wave-flume equipped with a controllable actuator. *Energies* (2023).
- [17] MARTINELLI, L., RUOL, P., AND FAVARETTO, C. Hybrid structure combining a wave energy converter and a floating breakwater. In *ISOPE International Ocean and Polar Engineering Conference* (2016).
- [18] OMRON. Omron documentation. <https://omron.it/it/home> [Online, 2023].
- [19] OMRON. Sysmac studio presentation, robotics and control system. <https://industrial.omron.it/it/products/sysmac-studio> [Online, 2023].
- [20] PENALBA, M., KELLY, T., AND RINGWOOD, J. Using nemoh for modelling wave energy converters: A comparative study with wamit.
- [21] PISCOPIA, R., CORSINI, S., INGHILESI, R., AND FRANCO, L. Misure strumentali di moto ondoso della rete ondamentrica nazionale: analisi statistica aggiornata degli eventi estremi.
- [22] SCHUELKE-LEECH, B.-A. Disruptive technologies for a green new deal. *Current Opinion in Environmental Science & Health* (2021).
- [23] SUN, J., HU, S.-L. J., AND LI, H. Computing free motion of floating structures by pole-residue operations.

- [24] SUNIL KUMAR MISHRA, DUSMANTA KUMAR MOHANTA, B. A. E. K. *OWC-Based Ocean Wave Energy Plants*. Springer, 2021.
- [25] WILSON, D. G., ROBINETT III, R. D., BACELLI, G., ABDELKHALIK, O., AND COE, R. G. Extending complex conjugate control to nonlinear wave energy converters. *Journal of Marine Science and Engineering* (2020).
- [26] ZHENG, C. W., WANG, Q., AND LI, C. Y. An overview of medium-to long-term predictions of global wave energy resources. *Renewable and sustainable energy reviews* (2017).