



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo di un codice di predizione degli sforzi dinamici e della potenza erogabile da Wave Energy Converter per applicazioni nel Mar Mediterraneo

G. Agati, A. Alikhani, D. Borello, G. Sannino

SVILUPPO DI UN CODICE DI PREDIZIONE DEGLI SFORZI DINAMICI E DELLA POTENZA EROGABILE DA WAVE
ENERGY CONVERTER PER APPLICAZIONI NEL MAR MEDITERRANEO

G. Agati, A. Alikhani, D. Borello (Sapienza Università di Roma),
G. Sannino (ENEA)

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: GENERAZIONE DI ENERGIA ELETTRICA CON BASSE EMISSIONI DI CARBONIO

Progetto: B.1.5 ENERGIA ELETTRICA DAL MARE

Obiettivo: Sviluppo di un codice di predizione degli sforzi dinamici e della potenza erogabile di Wave Energy Converter per applicazioni nel Mar Mediterraneo (b).

Responsabile del Progetto: G. Sannino (ENEA)

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sviluppo di un codice di predizione degli sforzi dinamici e della potenza erogabile di Wave Energy Converter per applicazioni nel Mar Mediterraneo"

Responsabile scientifico ENEA: G. Sannino

Responsabile scientifico Università Sapienza: D. Borello

Indice

SOMMARIO.....	6
1 INTRODUZIONE.....	7
2 GEOMETRIA E FUNZIONAMENTO DEL DISPOSITIVO.....	9
3 LO SCHEMA NUMERICO DI SIMULAZIONE.....	11
3.1 COEFFICIENTI IDRODINAMICI: ASPETTI TEORICI E PRATICI DEL CODICE NEMOH.....	12
3.2 DESCRIZIONE DEL CODICE WEC-SIM.....	14
4 DISCUSSIONE DEI RISULTATI.....	18
4.1 FREE-DECAY TESTS.....	18
4.2 SIMULAZIONI CON ONDA REGOLARE.....	19
4.3 SIMULAZIONI CON ONDA "USER-DEFINED".....	22
5 CONCLUSIONI.....	24
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	25
7 APPENDICE A - VALIDAZIONE DELLE PRESTAZIONI DEL CODICE NEMOH.....	26

Elenco delle figure

Figura 1: CAD e rappresentazione schematica del dispositivo studiato.	9
Figura 2: Schema semplificato del PEWEC, completo dei suoi sistemi di riferimento	10
Figura 3: Schema a blocchi del processo di simulazione di un wave energy converter.	11
Figura 4: Sistema di riferimento usato da WEC-Sim e da NEMOH e gradi di libertà di un generico WEC.	12
Figura 5: Esempio di divisione in pannelli per il calcolo dei coefficienti idrodinamici per il dispositivo PeWEC.	13
Figura 6: I tre programmi che compongono il codice ai pannelli NEMOH.	13
Figura 7: La struttura a blocchi del codice WEC-Sim [4].....	15
Figura 8: Modello di Simulink usato per la descrizione del dispositivo PeWEC.	15
Figura 9: File necessari e struttura della cartella di lavoro per il corretto funzionamento del codice WEC-Sim.	16
Figura 10: WecSimInputFile per una delle simulazioni numeriche svolte per il dispositivo PeWEC.	17
Figura 11: Andamento temporale del free-decay test per la rotazione di pitch dello scafo.	19
Figura 12: Plot in scala semi-logaritmica della FFT della risposta del free-decay test per la rotazione di pitch dello scafo.....	19
Figura 13: Due delle diverse mesh superficiali usate per calcolare i coefficienti idrodinamici dello scafo. A sinistra grandezza "media" dei pannelli, a destra grandezza "fine".	20
Figura 14: Risposta dinamica dello scafo in "pitch" per l'intero tempo della simulazione con un'onda regolare con periodo $T=2\text{sec}$	20
Figura 15: Confronto tra i risultati delle simulazioni e delle prove sperimentali in un generico intervallo di 5 sec per un'onda incidente con un periodo $T= 2$ sec. Dall'alto in basso: angolo di pitch dello scafo, del moto relativo del pendolo e potenza assorbita dal PTO.....	21
Figura 16: Curva di potenza al variare del periodo dell'onda incidente considerando e trascurando gli effetti viscosi.	22
Figura 17: Risposta dinamica del dispositivo al moto ondoso forzante misurato durante le prove sperimentali. Dall'alto verso il basso: angolo di pitch dello scafo, del moto relativo del pendolo e potenza assorbita dal PTO.....	23

Elenco delle tabelle

Tabella 1: Dimensioni caratteristiche del prototipo simulato e sue proprietà di massa e di volume.	10
Tabella 2: Caratteristiche del bacino di prova dell'INSEAN.	18
Tabella 3: Analisi di indipendenza della mesh.	20

Sommario

Il presente rapporto si riferisce alle attività di ricerca svolte presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale finalizzate allo sviluppo di un codice di calcolo di tipo Open Source adatto a studiare dispositivi di conversione energetica da moto ondoso (Wave Energy Converters – WEC) adatti all'impiego nel Mar Mediterraneo.

Un codice di simulazione in grado di predire le prestazioni di dispositivi galleggianti diversi rappresenta uno strumento potente per il test di configurazioni alternative, in grado di fornire una indicazione preliminare delle potenzialità di ognuna di esse.

Il codice selezionato allo scopo si chiama WEC-Sim, sviluppato in ambiente Matlab ed in grado di calcolare le azioni dinamiche e la potenza elettrica erogabile da un dispositivo galleggiante.

L'attività specifica ha richiesto di applicare e validare una catena di codici di simulazione disposti in cascata che hanno lo scopo di produrre i dati necessari al funzionamento di WEC-Sim. In particolare, a partire da una configurazione del dispositivo da realizzare utilizzando un software CAD, si sono dovuti realizzare sono stati usati codici per l'accoppiamento con il codice open source NEMOH, che genera i coefficienti idrodinamici del dispositivo WEC studiato, e di NEMOH con WEC-Sim.

Infine, si è svolta una attività di validazione di Nemoh facendo riferimento ad una configurazione semplificata (sfera galleggiante) per verificare la corrispondenza con un caso di libreria che usava un approccio diverso e a un dispositivo di conversione di energia dal moto ondoso realmente esistente chiamato PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter). Tale dispositivo è stato progettato e realizzato grazie ad una collaborazione tra Enea e Politecnico di Torino, con l'obiettivo di realizzare un dispositivo adatto all'utilizzo ai regimi d'onda e alla risorsa presenti nel Mediterraneo. Per questa configurazione erano disponibili i risultati di una serie di test sperimentali in scala ridotta svolti presso il CNR-INSEAN per valutarne le prestazioni. Tali risultati sono stati utilizzati come confronto.

I risultati del processo di validazione sono stati incoraggianti e hanno dimostrato l'affidabilità e l'accuratezza dell'insieme dei codici di calcolo implementati e sviluppati.

1 Introduzione

L'energia disponibile a partire dal moto ondoso costituisce potenzialmente una risorsa importante, in grado di contribuire efficacemente al raggiungimento di obiettivi di riduzione delle emissioni globali. Si stima che la potenza associata al moto ondoso sia compresa tra 1000 e 9000 GW e che la energia producibile sia compresa tra 9.000 e 80.000 TWh (IEA-OES Annual Report, 2007).

Diverse mappe della risorsa disponibile a livello mondiale mostrano che in zone particolari, per esempio dove si sente l'influenza degli Alisei, è possibile ottenere potenze specifiche del moto ondoso dell'ordine di 100 kW/m. In Europa del Nord, al largo della Scozia, si ottengono potenze specifiche tra i 60 e i 70 kW/m, ma tale risorsa è molto più limitata nel Mediterraneo dove il valore massimo si attesta attorno ai 13 kW/m (dati World Energy Council).

Parimenti, bisogna tener conto che una elevata potenza specifica è associata ovviamente a problemi legati alla sopravvivenza e alla durabilità di dispositivi esposti a condizioni meteomarine estremamente severe. Ciò ha comportato allo sviluppo di una serie di configurazioni possibili, basate su approcci di tipo diverso (Point Absorber, Attenuator, Overtopping,). Nessuna di queste configurazioni ha però superato un livello di sviluppo utile per la commercializzazione (TRL<7) e annualmente nuove configurazioni vengono proposte, e molte vengono abbandonate.

Tale situazione di incertezza è particolarmente sentita per le applicazioni nel Mar Mediterraneo, dove il numero delle installazioni è molto limitato, e dove le applicazioni sono per lo più prototipali. Lo studio di tali dispositivi, soprattutto di configurazioni innovative, comporta notevoli costi nella parte di prototipazione, test e messa in acqua. Se si considerano anche le incertezze in termini di procedure autorizzative e di sostegno pubblico (feed-in-tariff), si comprendono le scarse prospettive di sviluppo di questo tipo di tecnologia.

In questo contesto, la disponibilità di uno strumento di calcolo in grado di predire con una buona accuratezza la producibilità energetica di configurazioni innovative, potrebbe costituire un valido supporto ai processi di progettazione. Ovviamente tale soluzione non potrà sostituire i test sperimentali, ma potrà costituire uno strumento preliminare di valutazione e selezione tra scelte progettuali alternative.

Il presente accordo di collaborazione tra ENEA e il Dipartimento di Ingegneria Meccanica ed Aerospaziale dell'Università di Roma 'Sapienza', ha l'obiettivo di sviluppare uno strumento in grado di predire le azioni dinamiche sulla struttura di un dispositivo galleggiante di conversione di energia del moto ondoso e la sua producibilità in termini di potenza elettrica resa disponibile per un tipo d'onda tipico del Mar Mediterraneo. Le simulazioni numeriche sono state svolte utilizzando il codice open-source WEC-Sim, sviluppato dal Sandia National Laboratories e l'US Renewable Energy Laboratory con il supporto dell'US Department of Energy. Il calcolo dei coefficienti idrodinamici e delle forze indotte dal moto ondoso (massa aggiunta, forze di diffrazione e di radiazione) è stato invece affidato al codice open-source ai pannelli (Boundary Element Method, BEM) NEMOH, sviluppato dal Laboratoire de Recherche en hydrodynamique, énergétique et Environnement atmosphérique (LHEEA). L'attività di ricerca ha richiesto la validazione dei codici e lo sviluppo di software dedicati al loro accoppiamento. Allo scopo sono stati considerati un caso test di libreria (sfera galleggiante) e un caso reale già testato sperimentalmente.

Il dispositivo simulato è il PeWEC (Pendulum Wave Energy Converter) progettato e realizzato grazie ad una collaborazione tra Politecnico di Torino ed ENEA ([1], [2]). Il PeWEC è un sistema di conversione di energia dal moto ondoso a massa oscillante il cui funzionamento viene dettagliatamente descritto in seguito. La campagna di test sperimentali precedentemente svolta aveva permesso di verificare il funzionamento del dispositivo in condizioni di onda regolare. Nel presente lavoro si è verificato il funzionamento di tale dispositivo in tali condizioni, mantenendo costante l'altezza dell'onda incidente (H) e variandone il periodo (T). Si sono poi effettuati free-decay tests grazie ai quali sono state identificate le frequenze naturali del sistema. Infine, per riprodurre le prove sperimentali, il moto ondoso forzante misurato da specifiche sonde durante le prove sperimentali è stato utilizzato come input della simulazione. Tali prove hanno dimostrato

che il modello è in grado di riprodurre non solo i valori medi e massimi della potenza generata ma anche la dinamica del sistema.

Il documento è organizzato in 5 sezioni. Dopo l'Introduzione, viene brevemente descritto il dispositivo PeWEC qui utilizzato. Nella sezione 3 i diversi moduli del solutore validati ed assemblati nel corso della presente attività vengono descritti diffusamente allo scopo di fornire una idea chiara del funzionamento del codice ad altri utenti che volessero utilizzarlo. Successivamente i risultati delle simulazioni vengono descritti e confrontati con i dati sperimentali disponibili. Alcune conclusioni verranno tratte alla fine.

2 Geometria e funzionamento del dispositivo

Lo scopo del contratto è quello di sviluppare un codice *open source* in grado di simulare il funzionamento di dispositivi WEC galleggianti adatti per il Mar Mediterraneo. Il dispositivo considerato, PEWEC, riproduce una configurazione sviluppata appositamente per i mari italiani e testata sperimentalmente con regimi d'onda coerenti con le ipotesi fatte.

Il dispositivo oggetto delle simulazioni, mostrato in Figura 1: CAD e rappresentazione schematica del dispositivo studiato., è costituito da uno scafo galleggiante a cui è rigidamente collegato un telaio su cui è montato un pendolo in grado di oscillare rispetto ad una cerniera collegata all'albero di un generatore (detto Power Take Off, PTO). Le onde mettono in movimento lo scafo e il pendolo, per reazione, inizia ad oscillare mettendo in movimento anche l'albero del Power Take Off. Dal PTO è possibile estrarre energia elettrica dal moto oscillatorio del pendolo e, quindi, dalle onde. Infine lo scafo è tenuto in posizione rispetto al fondale marino mediante una linea di ormeggio.

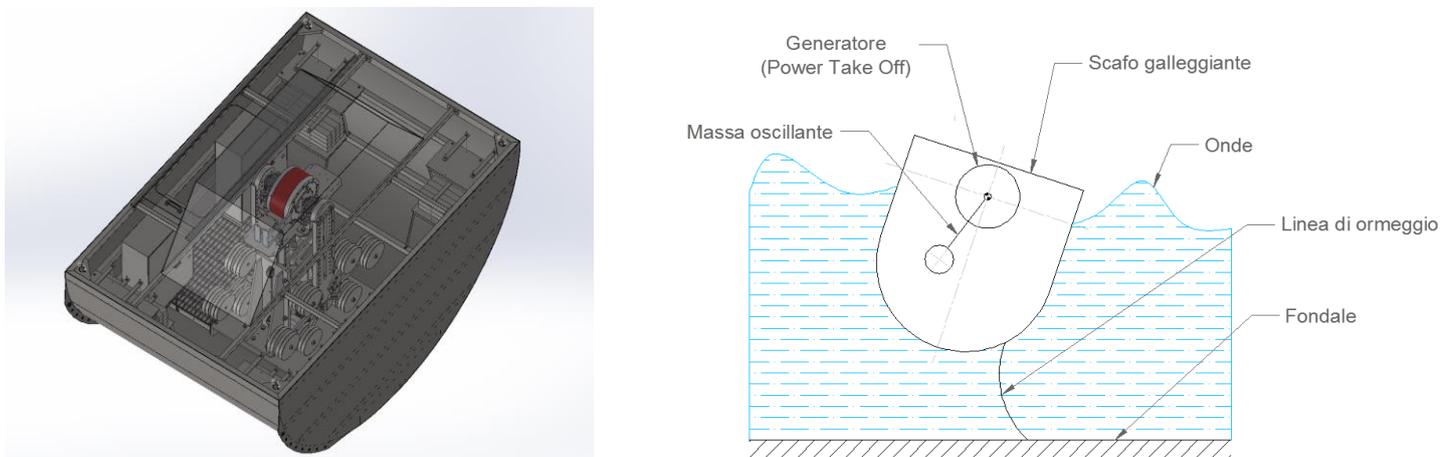


Figura 1: CAD e rappresentazione schematica del dispositivo studiato.

La dinamica del sistema può essere spiegata utilizzando le grandezze mostrate in Figura 2. L'angolo δ descrive il moto di beccheggio dello scafo nel sistema di riferimento globale nel quale l'asse x indica la direzione di propagazione delle onde, l'asse z punta verso l'alto mentre l'asse y si trova seguendo la regola della mano destra. L'angolo ε invece viene usato per descrivere la rotazione relativa del pendolo rispetto allo scafo. Le principali grandezze geometriche e le proprietà di massa del prototipo simulato sono riassunte in Tabella 1 dove l rappresenta la lunghezza del pendolo, d si riferisce alla distanza tra il centro di rotazione della cerniera ed il centro di massa dello scafo mentre r e w stanno ad indicare rispettivamente il raggio e la larghezza dello scafo galleggiante (hull). Le masse dello scafo e del pendolo sono state indicate invece con m_h e m_p . Infine I_h e I_p sono i momenti di inerzia dei due corpi attorno all'asse perpendicolare al piano XZ, calcolati al centro di massa per lo scafo e al centro della cerniera (A) per il pendolo.

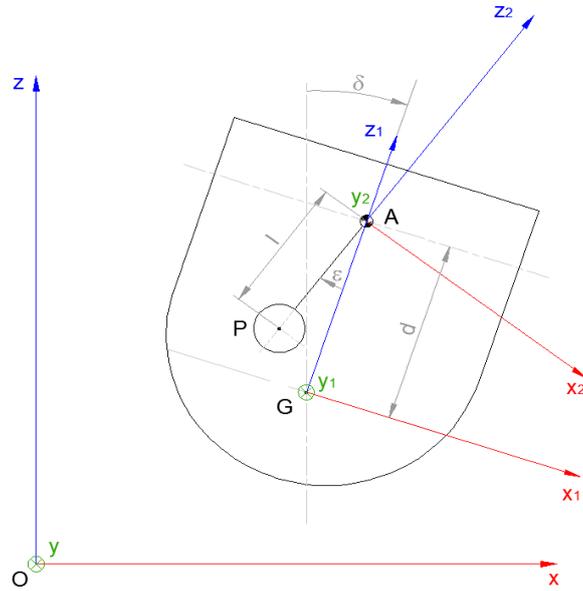


Figura 2: Schema semplificato del PEWEC, completo dei suoi sistemi di riferimento

Tabella 1: Dimensioni caratteristiche del prototipo simulato e sue proprietà di massa e di volume.

l (m)	d (m)	r (m)	w (m)	m_h (kg)	m_p (Kg)	I_h (Kg m ²)	I_p (Kg m ²)
0.886	0.858	1.5	2	3176	410	2168	88.18

3 Lo schema numerico di simulazione

L'interazione del dispositivo di conversione con il moto ondoso è stata simulata usando il codice WEC-Sim [3]. Tale codice è stato scelto avendo diverse caratteristiche idonee ai fini della presente attività. Prima di tutto è un codice di tipo open-source e questa caratteristica lo rende particolarmente vantaggioso ed interessante rispetto ad altri codici commerciali. Infatti WEC-Sim permette non solo di simulare condizioni d'onda su parametri pre-impostati e le azioni dinamiche su dispositivi di libreria ma anche di personalizzare il codice, per esempio ad inserire modelli d'onda più appropriati alle condizioni del Mar Mediterraneo. Il codice WEC-Sim richiede però la preliminare esecuzione di codici ancillari finalizzati alla generazione di una serie di dati di ingresso necessari allo svolgimento del programma. Il flusso di simulazioni è riassunto nello schema rappresentato in Figura 3.

WEC-Sim utilizza il metodo della diffrazione-radiazione per predire le azioni dinamiche delle onde sul dispositivo di conversione. Secondo tale teoria l'azione forzante delle onde risulta essere uguale alla somma delle componenti incidente, di quella radiata e di quella diffratta e necessita il calcolo delle forze idrodinamiche attraverso l'utilizzo di un solutore che adotti il metodo dei pannelli ([4]) nel campo delle frequenze. Esistono oggi diversi solutori BEM utilizzabili per la generazione di questi dati, per esempio WAMIT, AQWA-FER, Diodore, DIFFRACT, Hydrostar, Aquaplus. Tali solutori, però, sono associati a codici commerciali, e non costituiscono quindi una scelta praticabile in questo caso, dato l'interesse a sviluppare uno strumento completamente open-source. Si è deciso pertanto di utilizzare uno strumento open-source chiamato NEMOH [5] di recente produzione e non completamente validato prima di questa ricerca.

NEMOH, come i codici commerciali citati prima, necessita di un file di mesh che può essere generato o attraverso un software esterno o grazie ad una routine di Matlab fornita con il codice stesso. Ulteriori informazioni riguardo al calcolo dei coefficienti idrodinamici verranno fornite nella sezione 3.1. Per la specificazione della geometria del corpo e per la definizione delle sue proprietà di massa è necessario comunque passare per un programma CAD.

L'output di NEMOH consiste in una serie di file dati riguardanti i coefficienti idrodinamici calcolati dal codice per ognuno dei corpi costituenti il dispositivo. E' necessario perciò collezionare questi dati in un unico formato leggibile da WEC-Sim.

Pertanto è stato necessario acquisire uno strumento in grado di connettere i flussi di informazione tra i due codici. Il codice BEMIO (Boundary Element Method Input/Output), scritto in ambiente Python, legge i diversi file scritti in un formato standard da NEMOH e li riscrive in un unico file .h5 detto Hierarchical Data Format 5 (HDF5).

In questo modo WEC-Sim è in grado di acquisire i valori dei coefficienti idrodinamici necessari per la valutazione delle forze e dei momenti agenti sui dispositivi di conversione di energia dal moto ondoso (radiation damping, added mass, wave diffraction force, and wave excitation force).

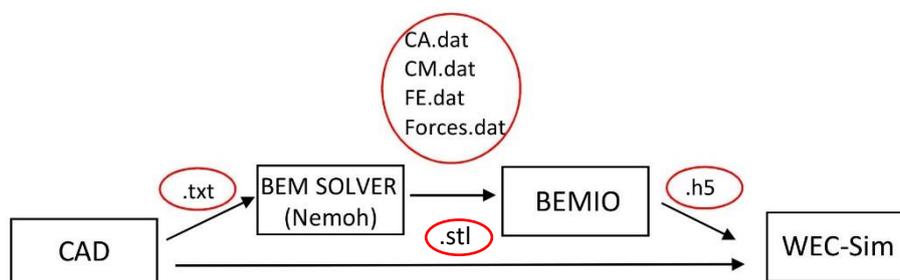


Figura 3: Schema a blocchi del processo di simulazione di un wave energy converter.

Il sistema di riferimento utilizzato dai codici descritti è quello mostrato in Figura 4. La direzione x rappresenta la direzione di propagazione delle onde, l'asse z punta verso l'alto mentre l'asse y può essere trovato seguendo la regola della mano destra. Nella stessa figura sono indicati pure i nomi dei 6 gradi di libertà di un generico dispositivo di conversione di energia del moto ondoso che sono utilizzati nel presente

report. Mentre l'orientamento del sistema di riferimento non cambia durante il processo di simulazione di un WEC, quello che cambia è l'origine di esso. Infatti mentre per il solutore BEM è necessario posizionarla al livello del mare in condizioni di equilibrio, WEC-Sim necessita come input dei file .stl per ognuno dei corpi con origine degli assi nei loro rispettivi centri di gravità.

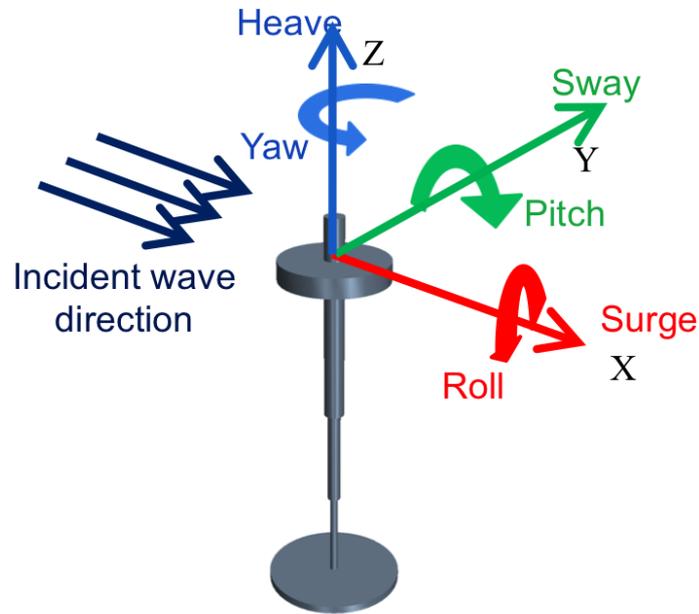


Figura 4: Sistema di riferimento usato da WEC-Sim e da NEMOH e gradi di libertà di un generico WEC.

3.1 Coefficienti idrodinamici: aspetti teorici e pratici del codice NEMOH

Il primo passo necessario nella modellazione idrodinamica di un dispositivo WEC è un'analisi nel campo delle frequenze. In questa prima è stato utilizzato NEMOH che è un codice open-source che utilizza il metodo dei pannelli (Boundary Elements Methods, BEM) basato sulla teoria lineare del flusso potenziale per il calcolo dei coefficienti idrodinamici al primo ordine. L'azione forzante delle onde è modellata come la somma delle componenti incidente, radiata e diffratta. Il codice è stato sviluppato dal Laboratoire de Recherche en hydrodynamique, énergétique et Environnement atmosphérique (LHEEA) e risolve l'equazione di Laplace per il potenziale della velocità in cui si ipotizza che il fluido sia non viscoso, incompressibile e irrotazionale:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \vec{V} = 0 \\ \nabla \times \vec{V} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

La pressione viene ricavata dall'equazione di Bernoulli scritta per il potenziale della velocità definito come $v = \nabla\phi$, mentre l'equazione di Laplace può essere ricavata dalla legge di conservazione della massa per flussi incomprimibili (la prima dell'equazione 1):

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad (2)$$

La scelta di NEMOH è stata dettata dal fatto che esso è l'unico codice basato sul metodo dei pannelli disponibile in formato open-source. Sebbene il codice sia stato già validato dagli stessi sviluppatori, prima di utilizzarlo è stato comunque necessario effettuare un confronto su un semplice test case tra i risultati

dati da esso e quelli ricavabili usando il codice commerciale WAMIT. Sono stati calcolati i carichi idrodinamici su una sfera sottoposta all'azione delle onde e confrontati con quelli calcolati con WAMIT. Il confronto tra i due set di dati ha mostrato che le curve sono perfettamente sovrapponibili (cft. appendice A).

Per funzionare, NEMOH ha bisogno come input di una griglia di punti che descriva la geometria della parte sommersa e a contatto con l'acqua del WEC. A questo scopo è possibile preparare un file .txt che ne descriva una discretizzazione in un formato prestabilito o, altrimenti, si può definire la forma della geometria del dispositivo ed utilizzare una routine di Matlab apposita (Mesh.m) per raffinare la discretizzazione. Un'altra alternativa, qui da noi seguita, è quella di fornire al codice una griglia superficiale prodotta con un programma CAD e trasformarla, con una routine appositamente sviluppata, in un file di input compatibile.

In ogni caso la sola parte sommersa del dispositivo deve essere descritta utilizzando un sistema di riferimento che abbia come origine degli assi il livello del mare in condizione di equilibrio. La griglia deve essere formata da pannelli quadrangolari piani essendo necessario discretizzare solo la superficie esterna del corpo sommerso. Un esempio di griglia usata per calcolare i coefficienti idrodinamici del dispositivo PeWEC è mostrata in Figura 5.

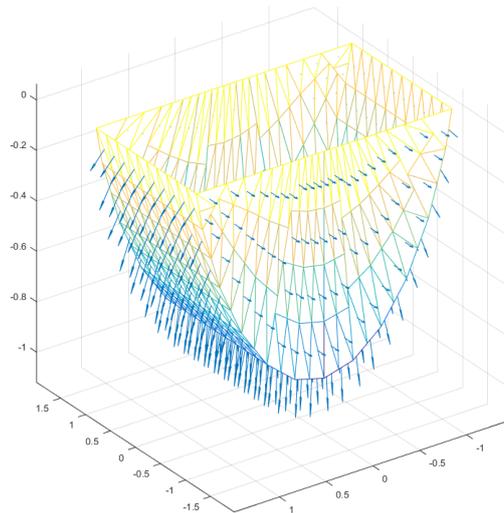


Figura 5: Esempio di divisione in pannelli per il calcolo dei coefficienti idrodinamici per il dispositivo PeWEC.

Il codice è composto comunque da tre sub-programmi mandati in esecuzione da linea di comando o tramite uno script di MATLAB (NEMOH.m) per come mostrato nello schema a blocchi in Figura 6. L'obiettivo del preprocessore è quello di processare la mesh e i tipi di calcoli da eseguire per ogni corpo. Nel solutore, invece, si risolve il problema al contorno (Boundary Value Problem, BVP) per il potenziale della velocità, si calcola la distribuzione delle pressioni, i coefficienti idrodinamici e l'elevazione dell'onda sul corpo. Il post processore riorganizza i risultati ottenuti dal solutore per riscriverli in un formato standard.

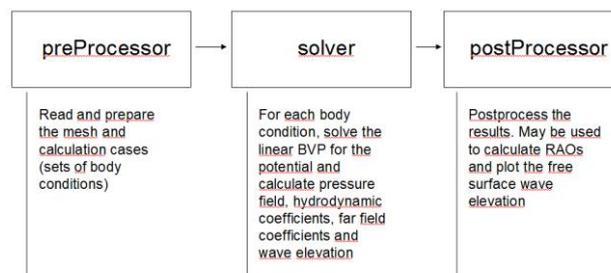


Figura 6: I tre programmi che compongono il codice ai pannelli NEMOH.

3.2 Descrizione del codice WeC-Sim

WEC-Sim (Wave Energy Converter Simulator) è uno strumento di simulazione open-source per dispositivi di conversione di energia dal moto ondoso. Ha l'abilità di modellare dispositivi composti da corpi rigidi, sistemi di power take-off e sistemi di ancoraggio [3]. Per risolvere l'equazione del moto in 6 gradi di libertà che governa la dinamica di un generico sistema WEC, WEC-Sim utilizza dei coefficienti idrodinamici derivati da un'analisi svolta con il metodo dei pannelli. Il codice è sviluppato in ambiente MATLAB/SIMULINK ed utilizza il solutore dinamico multi-body SimMechanics.

Nella sua forma più elementare, WEC-Sim risolve l'equazione di Cummins' in 6 gradi di libertà per determinare la dinamica di un dispositivo WEC [4]:

$$-\int_{-\infty}^t f_r(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau - F_{hs}(x) + F_e(t) + F_v(\dot{x}) + F_{ext}(x, \dot{x}) = (m + m_\infty)\ddot{x} \quad (3)$$

Nella Eq.3 il termine m rappresenta la matrice di massa, mentre m_∞ è la matrice di massa aggiunta resa indipendente dalla frequenza. Il termine $\int_{-\infty}^t f_r(t-\tau)\dot{x}(\tau)d\tau$ è l'integrale di convoluzione che rappresenta la forza resistiva esercitata dal corpo e dovuta alla radiazione dell'onda, mentre F_{hs} , F_e , F_v e F_{ext} rappresentano, rispettivamente: la forza di equilibrio idrostatico, la forza di eccitazione dovuta all'onda, la forza di resistenza viscosa e le forze esterne (e.g. le forze legate al sistema di power take off o le forze legate al sistema di ancoraggio). Con riferimento alla Figura 7, il processo di simulazione dell'interazione tra onda ed un dispositivo WEC può essere riassunto nei seguenti punti:

- Passo 1: L'utente dà come input le proprietà geometriche del Sistema WEC (masse, momenti di inerzia e posizione dei centri di gravità dei corpi componenti il sistema) e le specificazioni relative al tipo d'onda quali periodi e altezza. In alternativa è anche possibile introdurre l'intero spettro d'onda a cui il dispositivo verrà sottoposto.
- Passo 2: In una fase di pre-processing il modulo Wave-Sim genera delle serie temporali che riproducono il fronte d'onda selezionato e il codice BEM utilizzato determina i carichi idrodinamici sul dispositivo.
- Passo 3: Si crea un modello di Simulink dinamico multi-body del dispositivo, utilizzando dei componenti da scegliere all'interno di una libreria precostruita ed in grado di riprodurre le connessioni fra i corpi.
- Passo 4: Il solutore multibody SimMechanics esegue la simulazione risolvendo ognuno dei 6 gradi di libertà che può avere il sistema, sommando le forze calcolate ad ogni istante temporale e facendo avanzare la soluzione nel tempo usando uno schema di integrazione di Runge-Kutta al quarto ordine.

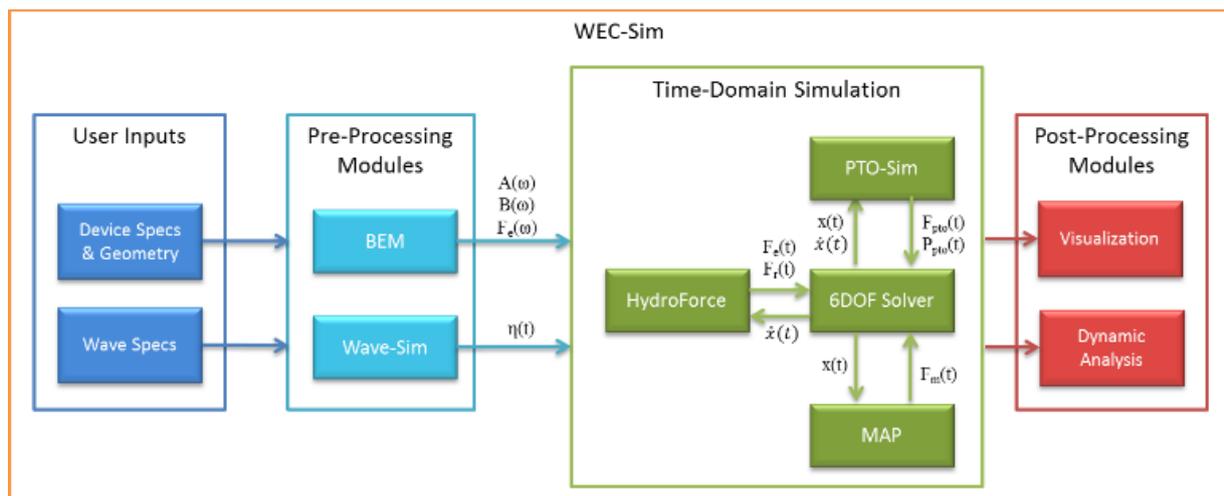


Figura 7: La struttura a blocchi del codice WEC-Sim [4].

Un esempio di modello costruito con Simulink ed usato nelle simulazioni è riportato in Figura 8. Questo mostra come i vari componenti sono collegati l'un l'altro, nonché il tipo e la locazione del TPO. Lo scafo è collegato al fondale che rappresenta il sistema di riferimento fisso e si può muovere in 3 gradi di libertà (surge, heave e pitch). Gli altri gradi di libertà sono stati trascurati avendo ipotizzato che le onde si propaghino nella sola direzione x e il corpo risulta essere simmetrico rispetto al piano xOz . Mentre nella computazione sono necessari i coefficienti idrodinamici dello scafo, il pendolo, non essendo a diretto contatto con le onde, viene visto come un "non-hydrodynamic body". Il PTO, che sfrutta la rotazione dell'albero a cui è vincolato il pendolo per produrre energia elettrica, viene fissato al punto dove il pendolo è vincolato allo scafo.

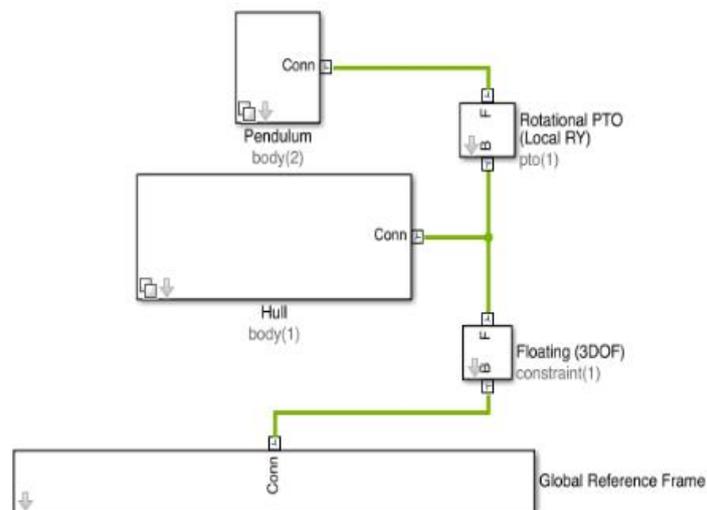


Figura 8: Modello di Simulink usato per la descrizione del dispositivo PeWEC.

Il file eseguibile WecSim.m, posizionato nella cartella \$WEC-Sim/source legge il file di input WecSimInputFile.m in cui vengono riassunti i parametri delle prove che si vogliono eseguire e avvia le simulazioni non stazionarie. Tale file deve essere posizionato nella cartella di lavoro come mostrato in Figura 9.

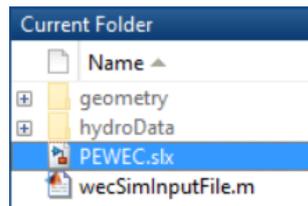


Figura 9: File necessari e struttura della cartella di lavoro per il corretto funzionamento del codice WEC-Sim.

Un esempio dell'input file usato nelle simulazioni del dispositivo PeWEC è mostrato in Figura 10. Si può quindi vedere quali informazioni è necessario dare per simulare l'interazione tra le onde e il dispositivo WEC e quali parametri è possibile modificare per rappresentare al meglio la dinamica del dispositivo in esame. Il file è diviso in diverse sezioni ciascuna relativa ad uno degli "Oggetti" di WEC-Sim. Ogni oggetto viene prima inizializzato e poi ne vengono definite le proprietà.

Nella prima parte relativa alla "Simulation Class" (da riga 2 a riga 15) viene chiamato il modello di Simulink/SimMechanics; vengono poi definiti i parametri della simulazione come il passo temporale (time step), la durata totale della simulazione e il *ramp-time* usato per definire l'azione forzante delle onde.

La seconda sezione (da riga 16 a riga 24) riguarda la "Wave Class" ed è la parte del file di input dove si definisce il tipo d'onda e le sue caratteristiche. Nell'esempio riportato la simulazione utilizzava un tipo d'onda regolare, con un periodo $T=2,5$ sec ed un'altezza $H=0,15$ m. Nel caso di onda regolare si assume che la risposta dinamica del sistema sia di tipo sinusoidale e stazionaria. Per calcolare la forza di radiazione dell'onda si usano coefficienti costanti di massa aggiunta e di smorzamento, piuttosto che calcolare l'integrale di convoluzione. In alternativa al profilo d'onda regolare è possibile impostare come *waves.type* il caso *noWave*, in cui la simulazione viene effettuata senza la presenza di onde usando, anche in questo caso, coefficienti di massa aggiunta e dello smorzamento della radiazione costanti. Tale caso viene tipicamente usato per effettuare i cosiddetti *free decay tests* allo scopo di valutare le frequenze naturali di oscillazione del sistema. Nel caso reale l'onda è di tipo irregolare, si possono utilizzare una serie di spettri d'onda preimpostati [3] (Pierson Moskowitz, Bretschneider, Jonswap) per i quali bisogna definire altezza dell'onda e periodo significativi. In alternativa è possibile impostare uno spettro d'onda caratteristico di una particolare località riproducendo le frequenze dell'onda e la densità di energia dello spettro. Questa capacità risulta essere particolarmente utile quando siano resi disponibile dei dati misurati da boe ondometriche.

Infine, (da riga 25 a riga 45) si devono introdurre nel file di input specifiche riguardanti i corpi che compongono il sistema di conversione di energia dal moto ondoso. Prima di tutto bisogna specificare i coefficienti idrodinamici precedentemente calcolati per ogni corpo che interagisce con le onde. Bisogna poi indicare le proprietà di massa dei corpi, i loro pesi, i momenti di inerzia e le posizioni dei loro centri di gravità. Il corpo 2, che rappresenta il pendolo nella presente simulazione, è stato impostato come un corpo non idrodinamico (*body(2).nhBody=1*) in quanto pur muovendosi per effetto delle onde, non è a diretto contatto con esse: non è dunque necessario valutare l'interazione tra esso e il campo d'onda definito all'interno della *wave class*. I file *.stl* riguardanti la geometria dei corpi così come le linee in cui si specifica colore ed opacità dei corpi servono solo ai fini di visualizzare i risultati ottenuti con un post-processore grafico (in questo caso Paraview [6]). L'ultima parte del file riguarda i vincoli necessari a collegare i corpi e a definire i loro moti assoluti e relativi. Si specifica inoltre il tipo di Power Take Off usato (che, come detto, in questo caso è di tipo rotazionale) e il punto in cui esso è posizionato. All'interno di questa classe si può andare a definire pure un coefficiente di smorzamento lineare e una rigidità per rappresentare al meglio il sistema di PTO.

```

1  %% Simulation Data
2 - simu = simulationClass();           %Create the Simulation Variable
3 - simu.simMechanicsFile = 'PEWEC.slx'; %Location of Simulink Model File
4 - simu.endTime= 400;                %Simulation End Time [s]
5 - simu.dt = 0.01;                   %Simulation Time-Step [s]
6 - %simu.dt = 0.005;                  %Simulation Time-Step [s]
7 - %simu.dtFeNonlin = 0.05;
8 - simu.rampT = 100;                  %Wave Ramp Time Length [s]
9 - %simu.nlHydro = 1;
10 - %simu.mode = 'rapid';
11 - %simu.explorer = 'off';
12 - simu.nlHydro = 0 ;
13 - %simu.paraview = 1 ;
14 - simu.outputtxt = 1 ;
15 - simu.domainSize = 10 ;
16 %% Wave Information
17 %% Regular Waves
18 - waves = waveClass('regular');
19 - % waves = waveClass('regular');
20                                     %Create the Wave Variable and Specify Type
21
22 - waves.H = 0.15;                   %Wave Height [m]
23 - waves.T = 2.5;                    %Wave Period [s]
24
25 %% Body Data
26 - body(1) = bodyClass('hydroData/Half.h5',1);
27 - %Create the body(1) Variable, Set Location of Hydrodynamic Data File
28 - %and Body Number Within this File.
29 - body(1).mass = 3176 ;
30 - %Body Mass. The 'equilibrium' Option Sets it to the Displaced Water
31 - body(1).momOfInertia = [0 2168 0];
32 - body(1).geometryFile = 'geometry/SCAFO.stl'; %Location of Geomtry File
33 - body(1).viz.color = [1 1 0] ;
34 - body(1).viz.opacity = 0.25 ;
35
36 - body(2) = bodyClass('',2);
37 - body(2).nhBody = 1 ;
38 - body(2).mass = 400 ;
39 - body(2).momOfInertia = [0 88.18 0];
40 - body(2).geometryFile = 'geometry/FENDOLO.stl';
41 - body(2).cg = [0 0 -0.028];
42 - body(2).dispVol = 0;
43 - body(2).viz.color = [1 0 0] ;
44 - body(2).viz.opacity = 1 ;
45
46 %% PTO and Constraint Parameters
47 - constraint(1) = constraintClass('Constraint1');
48 - %Create Constraint Variable and Set Constraint Name
49 - constraint(1).loc = [0 0 -0.89]; %Constraint Location [m]
50
51
52 - pto(1) = ptoClass('PTO1');
53 - %Create PTO Variable and Set PTO Name
54 - pto(1).k=0; %PTO Stiffness [N/m]
55 - pto(1).c= 40 ; %PTO Daming [N/(m/s)]

```

Figura 10: WecSimInputFile per una delle simulazioni numeriche svolte per il dispositivo PeWEC.

Una volta fornite tutte le informazioni ed i parametri necessari per la simulazione, è necessario eseguire il modulo wecSim.m dalla cartella di lavoro per calcolare le azioni dinamiche e la potenza generabile dal dispositivo. Si producono così delle serie temporali organizzate in array di dimensione [(numero di time step) x 6], essendo 6 in generale i gradi di libertà del sistema. E' possibile visualizzare poi posizione, velocità ed accelerazioni dei corpi costituenti il sistema WEC, tutte le forze agenti su esso, la distribuzione delle pressioni sul corpo e la potenza meccanica ed elettrica prodotte.

4 Discussione dei risultati

In questa sezione vengono presentati e discussi i risultati ottenuti applicando al dispositivo PeWEC la catena di simulazione precedentemente spiegata. WEC-Sim è stato utilizzato per eseguire tipi diversi di simulazioni i cui risultati sono stati poi validati utilizzando quelli ricavati durante le prove sperimentali eseguite all'Istituto Nazionale per Studi ed Esperienze di Architettura Navale (CNR-INSEAN). Questo test-case è stato selezionato perché il dispositivo è stato pensato e progettato per interagire con un tipo d'onda tipico del Mar Mediterraneo. Le prove sperimentali [7], condotte grazie ad una collaborazione tra ENEA e Politecnico di Torino, sono state effettuate su un prototipo del dispositivo PeWEC in scala 1:12 con l'obiettivo di studiare la risposta dinamica di esso alle sollecitazioni di diversi tipi di onda. E' utile far presente che i risultati di questo studio sono stati pubblicati e presentati alla conferenza OSES 2016 [8]. Le caratteristiche del bacino di prova CNR-INSEAN in cui sono state effettuate le prove sono riassunte in Tabella 2 insieme ai tipi di onde regolari a cui è stato sottoposto il dispositivo.

Tabella 2: Caratteristiche del set di prova del bacino CNR-INSEAN.

Bacino di prova	
Lunghezza	220 m
Larghezza	9 m
Profondità	3.5 m
Onde regolari	
Periodi	1.9 – 2.9 sec
Altezza	0.15 m

Al fine di studiare le prestazioni del sistema, durante le prove sperimentali sono state registrate ed analizzate le seguenti grandezze:

- $\delta(t)$ = angolo di beccheggio dello scafo
- $\varepsilon(t)$ = rotazione relativa pendolo-scafo
- $\dot{\varepsilon}(t)$ = velocità angolare relativa pendolo-scafo
- $P(t)$ = potenza assorbita dal PTO

Durante le prove si è usata una frequenza di acquisizione pari a 50 Hz. Nelle simulazioni è stata scelta la stessa frequenza in modo da rendere i risultati più facilmente comparabili. Le simulazioni condotte possono essere divise nei seguenti sets di simulazioni:

1. Free-decay tests
2. Simulazioni con onde regolari
3. Simulazioni con onde reali, ricostruite utilizzando le serie sperimentali basate sulle onde misurate da specifiche sonde.

4.1 Free-decay tests

Per ricavare le sue frequenze naturali di oscillazione del PeWEC, si è preliminarmente eseguito un free-decay test sul moto rotazionale di pitch dello scafo. Per queste frequenze dell'onda ci si aspetta di individuare dei picchi nelle oscillazioni dello scafo e, quindi, nella potenza assorbita dal PTO. Per realizzare questo tipo di test è stata imposta una rotazione iniziale di $\delta=25^\circ$ sullo scafo rispetto alla sua posizione di equilibrio. In Figura 11 è mostrato l'andamento temporale delle oscillazioni dello scafo dovute alla rotazione iniziale imposta. Quindi, è stata condotta un'analisi spettrale in frequenza, andando a calcolare la trasformazione di Fourier (Fast-Fourier transformation, FFT) della risposta del sistema. Sono state

individuare due delle frequenze naturali del sistema, i cui due picchi sono chiaramente visibili in Figura 12. Essi corrispondono a periodi di $T_1=1.967$ sec and $T_2 =2.553$ sec.

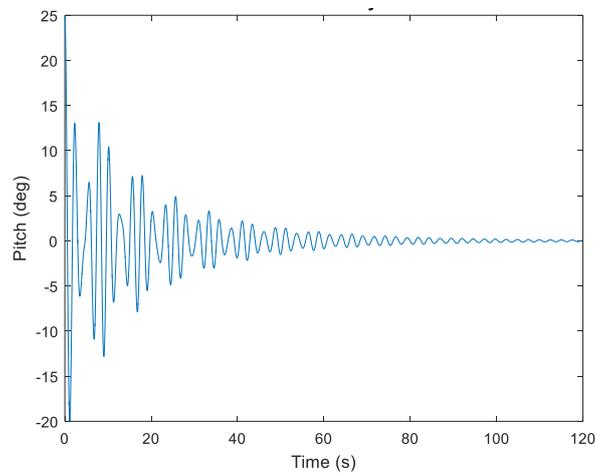


Figura 11: Andamento temporale del free-decay test per la rotazione di pitch dello scafo.

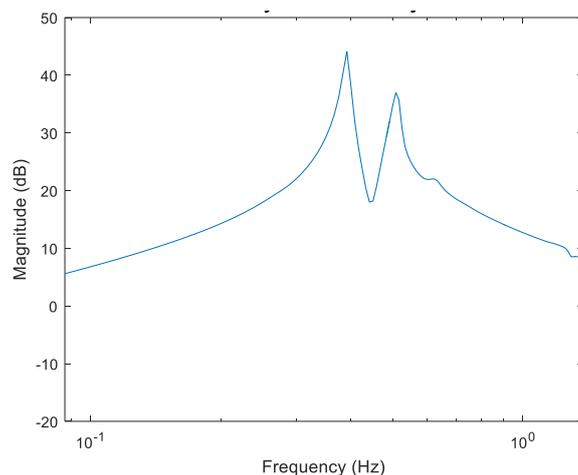


Figura 12: Plot in scala semi-logaritmica della FFT della risposta del free-decay test per la rotazione di pitch dello scafo.

4.2 Simulazioni con onda regolare

Successivamente si è studiata la risposta dinamica del dispositivo PeWEC sottoposto all'azione di un campo d'onde regolari con un'ampiezza di 75 mm e con un periodo che è stato fatto variare in un intervallo che va dai 1.9 ai 2.9 sec.

Preliminarmente è stato effettuato un primo set di simulazioni variando la discretizzazione del dispositivo, usando un diverso numero di pannelli, per verificare che la risoluzione della mesh non influenzasse in modo significativo i risultati ottenuti nella fase di caratterizzazione idrodinamica del dispositivo. Questa analisi preliminare di rifinitura della mesh è stata intrapresa per trovare un buon compromesso tra accuratezza dei risultati ottenuti e tempi computazionali della simulazione. Nella Tabella 3 sono riassunti i risultati relativi all'angolo di pitch ϵ e del moto relativo del pendolo rispetto a quello dello scafo utilizzando diversi numeri di pannelli. Dall'analisi dell'errore relativo tra gli angoli calcolati con la simulazione e quelli misurati durante le prove sperimentali si è ritenuto che la mesh con 450 pannelli garantiva il miglior compromesso tra errore relativo e costo computazionale.

Tabella 3: Analisi di indipendenza della mesh.

Numero di pannelli	82	450	800
Massimo angolo relativo di pitch del pendolo	29.5°	31.4°	31.7°
Errore relativo	7%	1%	0.05%

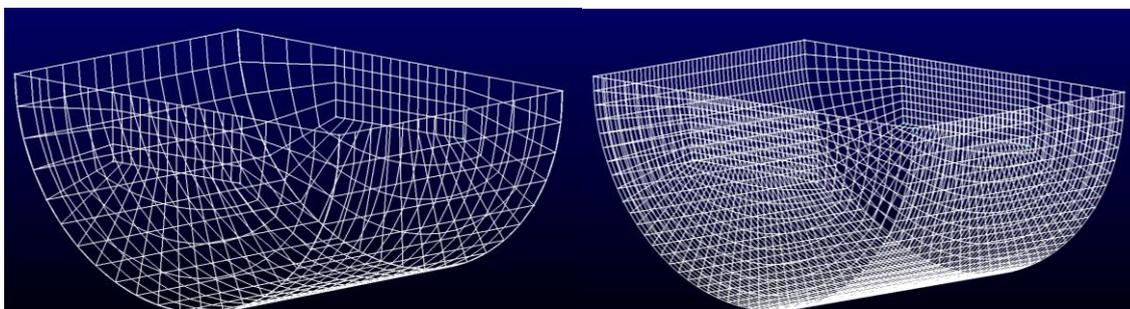


Figura 13: Due delle diverse mesh superficiali usate per calcolare i coefficienti idrodinamici dello scafo. A sinistra grandezza "media" dei pannelli, a destra grandezza "fine".

Nel set di simulazioni qui presentate è stata studiata la risposta dinamica del dispositivo variando, per ogni simulazione, il periodo delle onde incidenti.

La Figura 14: Risposta dinamica dello scafo in "pitch" per l'intero tempo della simulazione con un'onda regolare con periodo T=2sec. Figura 14 mostra la rotazione dello scafo per l'intera durata della simulazione, mostrando una buona corrispondenza dei valori massimi di oscillazione e del loro periodo di oscillazione. Nel caso reale, il tempo di avvio delle oscillazioni è più lungo in quanto è necessario che il moto ondoso imposto all'acqua del bacino sia sufficientemente sviluppato per poter innescare l'oscillazione del dispositivo.

I grafici mostrati in Figura 15 comparano i risultati relativi agli angoli di pitch dello scafo, quello relativo del pendolo e la potenza assorbita dal PTO per un'onda incidente con un periodo T=2 sec in un intervallo di 5 secondi. Dai grafici riportati si può affermare che la risposta dinamica del dispositivo viene ben rappresentata dal modello utilizzato sia in fase che in ampiezza dell'oscillazione.

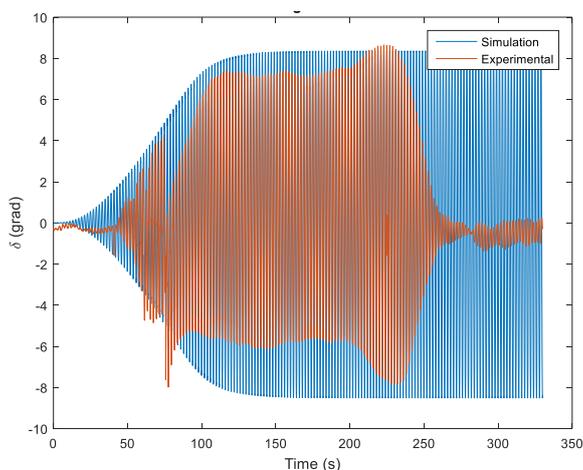


Figura 14: Risposta dinamica dello scafo in "pitch" per l'intero tempo della simulazione con un'onda regolare con periodo T=2sec.

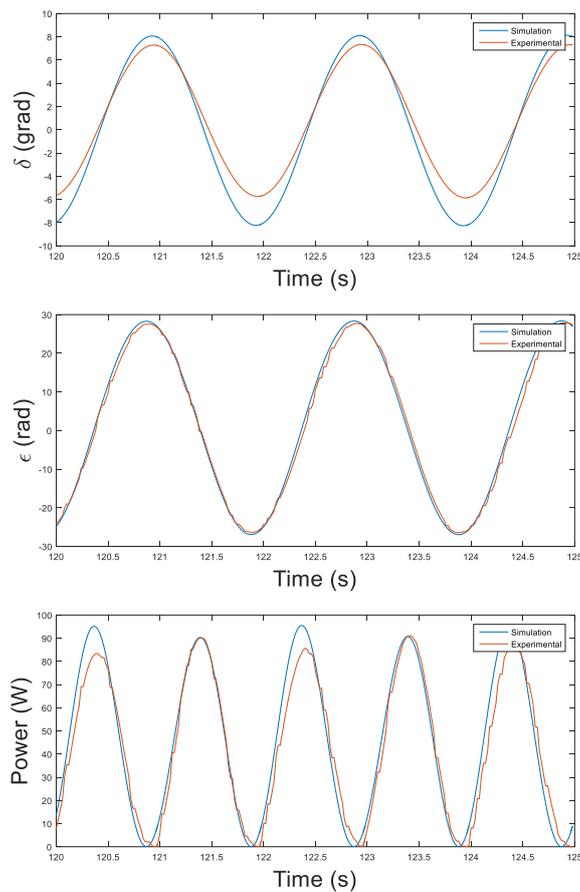


Figura 15: Confronto tra i risultati delle simulazioni e delle prove sperimentali in un generico intervallo di 5 sec per un'onda incidente con un periodo $T=2$ sec. Dall'alto in basso: angolo di pitch dello scafo, del moto relativo del pendolo e potenza assorbita dal PTO.

La curva di potenza basata sui valori medi ottenuti per i vari periodi dell'onda incidente è presentata in Figura 16. In un primo set di simulazioni, l'effetto dello smorzamento viscoso sulle oscillazioni non è stato preso in considerazione al fine di valutare l'influenza di questo parametro sulle simulazioni. Come atteso, le maggiori differenze tra dati sperimentali e simulazioni numeriche si trovano per i periodi caratteristici delle frequenze naturali del sistema calcolate con il *free-decay* test. In corrispondenza di questi periodi infatti, la potenza assorbita dal PTO viene sovrastimata, mentre per gli altri periodi dell'onda incidente le misurazioni sperimentali e i risultati delle simulazioni numeriche mostrano valori molto simili. In corrispondenza delle frequenze naturali e per un periodo $T=2$ sec la potenza viene sovrastimata di circa il 40%, mentre per un periodo $T=2.5$ sec di quasi il 360%. Introducendo lo smorzamento viscoso nelle equazioni del moto questo errore viene considerevolmente ridotto.

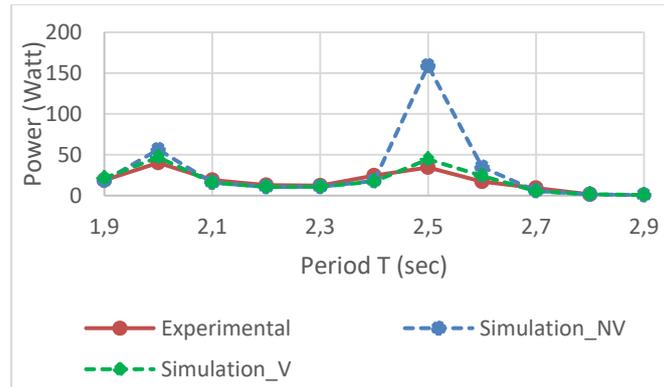


Figura 16: Curva di potenza al variare del periodo dell'onda incidente considerando e trascurando gli effetti viscosi.

Una breve digressione è ora necessaria per spiegare come è possibile introdurre gli effetti di smorzamento dovuti alla viscosità all'interno di WEC-Sim. Questa forza infatti viene generalmente introdotta nell'equazione del moto del dispositivo specificando due termini di smorzamento, il primo lineare ed il secondo quadratico:

$$F_v = -C_{ld}\dot{x} - \frac{1}{2}C_d\rho A_D\dot{x}|\dot{x}| \quad (4)$$

dove C_{ld} è il coefficiente lineare di smorzamento, C_d è il coefficiente quadratico di resistenza (quadratic viscous drag coefficient), ρ è la densità del fluido e A_D è l'area caratteristica del corpo immerso in acqua. Nelle presenti simulazioni è stato considerato solo il termine quadratico della forza viscosa visto che il termine lineare viene generalmente trascurato nell'analisi dei WEC. Vista la forma particolarmente semplice e regolare dello scafo del PeWEC il coefficiente quadratico è stato preso da letteratura [9]. Un'altra via percorribile per raffinare i risultati sarebbe potuta essere quella spiegata per esempio in [10] in cui tale coefficiente viene regolato confrontando i risultati delle simulazioni con i dati sperimentali in una prova di free-decay. In questo caso tale approccio non è stato applicabile non essendo disponibili delle prove sperimentali che riproducessero questo tipo di analisi.

4.3 Simulazioni con onda "user-defined"

Infine sono state condotte delle simulazioni usando come input il moto ondoso forzante misurato durante le prove sperimentali da specifiche sonde. Questo è stato fatto fornendo al codice l'elevazione dell'onda misurata durante le prove in vasca per ogni istante temporale. Infatti, per verificare la qualità dell'onda durante le prove sperimentali erano state posizionate 13 sonde in punti diversi del bacino di prova che misurassero il profilo dell'onda. In questo modo il dispositivo è stato sottoposto ad un campo ondoso più rappresentativo del caso reale che tenesse conto di vari effetti come per esempio la riflessione dell'onda dovuta alle pareti della vasca o il ritardo tra il momento in cui il generatore dell'onda veniva acceso e il momento in cui la prima onda veniva ad interagire con il dispositivo. I risultati delle simulazioni sono mostrati in Figura 17. L'evoluzione dinamica del dispositivo viene in questo caso meglio riprodotta rispetto al caso mostrato in Figura 14; sebbene i valori massimi e medi fossero già ben riprodotti, questo tipo di simulazione permette di predire in modo più accurato la dinamica del sistema ad ogni istante considerato. Si fa presente che questo tipo di dati di ingresso sono quelli caratteristici delle condizioni reali e sarà necessario utilizzarlo per avere un'idea più precisa sulla compatibilità di un sistema WEC per una certa località, nei casi in cui siano disponibili dei dati misurati da boe ondametrische.

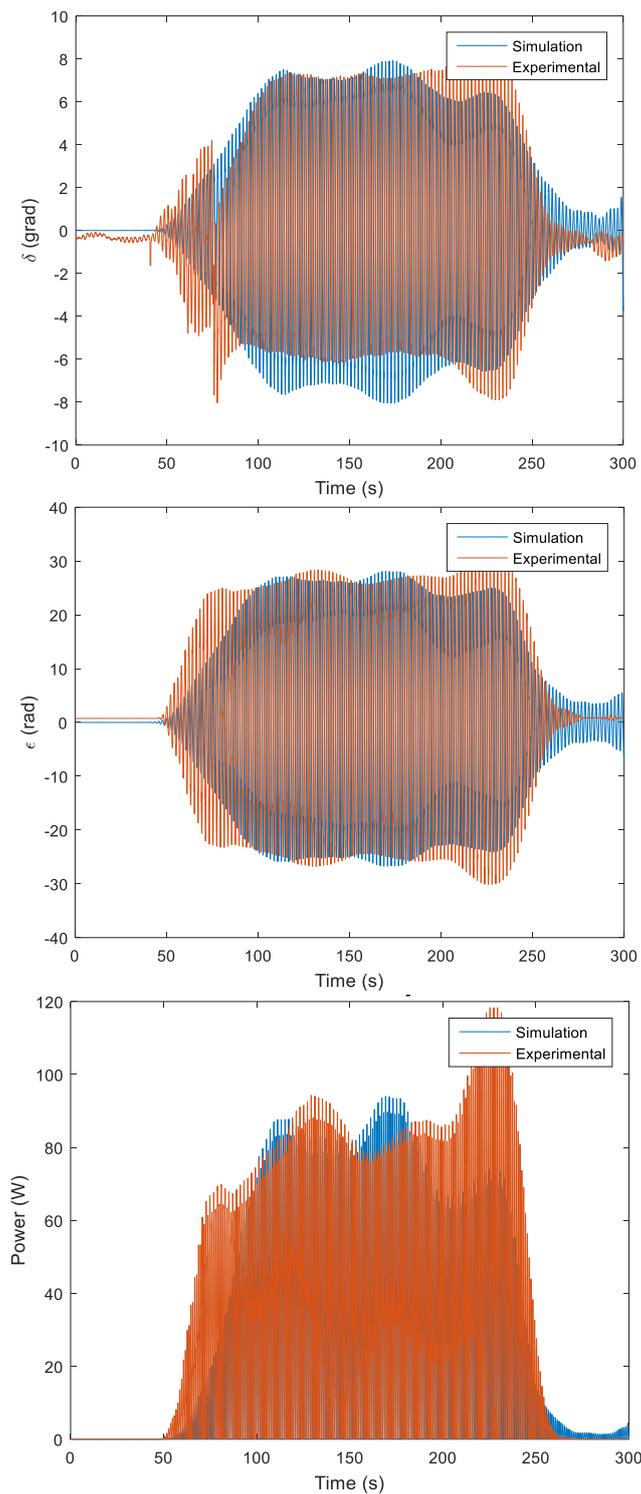


Figura 17: Risposta dinamica del dispositivo al moto ondoso forzante misurato durante le prove sperimentali. Dall'alto verso il basso: angolo di pitch dello scafo, del moto relativo del pendolo e potenza assorbita dal PTO.

5 Conclusioni

Il presente rapporto riassume l'attività di ricerca svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Meccanica e Aerospaziale e riguardante lo sviluppo e la validazione di una strategia di simulazione della dinamica di dispositivi WEC galleggianti.

Le principali considerazioni sono nel seguito riportate:

1. Un software di calcolo open-source delle azioni dinamiche e della potenza estraibile da WEC galleggianti è stato sviluppato e validato. L'accoppiamento tra le diverse sezioni del codice è stato realizzato e verificato. Il codice è disponibile gratuitamente e i dettagli dell'implementazione sono messi a disposizione degli utilizzatori.
2. Le simulazioni svolti su un caso di riferimento di libreria e su una configurazione reale sperimentalmente testata hanno dimostrato la accuratezza del codice e la sua capacità a riprodurre le frequenze caratteristiche di oscillazione. Si è inoltre verificata la necessità di inserire l'effetto di smorzamento viscoso nell'equazione del moto del dispositivo se si vuole ottenere una corretta predizione della potenza sviluppata.
3. Il codice è in grado di acquisire come dato di ingresso un profilo d'onda qualsiasi e ciò permette di utilizzarlo per predire le prestazioni dei dispositivi considerati in ogni località di interesse una volta che siano disponibili i dati ottenuti da boe ondometriche o da altri tipi di analisi del moto ondoso locale.

6 Riferimenti bibliografici

- [1] Report RdS/2014/226 – “Metodologia progettuale del sistema di conversione “passivo””, G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, 2014
- [2] Report RdS/PAR2014/227 – “Progettazione e costruzione del sistema di conversione in scala intermedia”, G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, 2014
- [3] National Renewable Energy Laboratory and Sandia Corporation, <<http://wec-sim.github.io/WEC-Sim/>>
- [4] Yu, Y.H. & Lawson, M., “Development and demonstration of the WEC-Sim wave energy converter simulation tool”, Proceedings of the 2nd Marine and Energy Technology Symposium, 2014
- [5] Laboratoire de recherche en Hydrodynamique, Énergétique et Environnement Atmosphérique (LHEEA), <http://lheea.ec-nantes.fr/doku.php/emo/nemoh/start>
- [6] <http://www.paraview.org/>
- [7] Report RdS/2014/228B – “Attività sperimentali sul dispositivo PEWEC in scala 1:12” - G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, N. Pozzi, E. Giovannini, A. Fontanella, G. Sannino
- [8] G. Agati, A. Alikhani, D. Borello, G. Bracco, G. Mattiazzo, N. Pozzi, G. Sannino, F. Rispoli, G. Vissio, “Assessment of Loads and Performance of a Wave Energy Converter for the Mediterranean Sea”, OSES 2016, Malta, 13-16 Luglio 2016
- [9] Det Norske Veritas foundation, “Modelling and Analysis of Marine Operations , tech. rep. DNV-RP-H103”, Det Norske Veritas, 2011
- [10] M. Lawson, B.B. Garzon, F. Wendt, Y.-H. Yu, C. Michelen, “COER hydrodynamic modelling competition: modelling the dynamic response of a floating body using the Wec-Sim and Fast simulation tools”, 34th International Conference on Ocean, Offshore, and Arctic Engineering (OMAE 2015), 2015

7 Appendice A - Validazione delle prestazioni del codice NEMOH

I risultati ottenuti utilizzando il codice open-source NEMOH sono stati verificati con i risultati del codice commerciale WAMIT che è di solito utilizzato per generare i dati di ingresso da fornire a WEC-Sim.

