



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile



MINISTERO DELLO SVILUPPO ECONOMICO



Ricerca di Sistema elettrico

LA1.5: Analisi dei requisiti progettuali e normativi per Wave Energy Converters

B. Paduano, C. Moscoloni, F. Pilato, G. Bracco, G. Mattiazzo

Report RdS/PTR(2019)/167

LA1.5: Analisi dei requisiti progettuali e normativi per Wave Energy Converters

B. Paduano, C. Moscoloni, F. Pilato, G. Mattiazzo, G. Bracco

Ottobre 2019

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - I annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.8 Energia elettrica dal mare

Work package: Energia elettrica dal mare

Linea di attività: LA1.5: Analisi dei requisiti progettuali e normativi per Wave Energy Converters

Responsabile del Progetto: Gianmaria Sannino ENEA

Responsabile del Work package: Gianmaria Sannino ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Piano triennale di realizzazione 2019-2021 della ricerca di sistema elettrico nazionale*"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Giuliana Mattiazzo

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 NORMATIVA NAZIONALE: RINA.....	6
2.1 DIMENSIONAMENTO.....	6
2.2 CARICHI.....	7
2.3 CARICHI DEGLI ORMEGGI.....	9
2.4 ANALISI DI FATICA.....	10
3 NORMATIVA INTERNAZIONALE.....	10
3.1 CONDIZIONE DI CARICO.....	11
3.2 STANDARD: CONDIZIONI DI PROGETTO.....	12
3.3 STATI ESTREMI.....	12
3.4 CARICHI DEGLI ORMEGGI.....	13
3.5 DESIGN DELLE STRUTTURE IN ACCIAIO.....	13
3.6 COEFFICIENTE DI CARICO E DI RESISTENZA.....	13
3.7 ANALISI DI FATICA.....	14
4 CONCLUSIONI.....	14
5 BIBLIOGRAFIA.....	15
6 APPENDICE.....	16

Sommario

Il presente documento fornisce una descrizione dei passi da seguire ai fini della progettazione strutturale di un wave energy convertitore (WEC) in conformità con gli standard nazionali e internazionali.

In particolare, per quanto riguarda la normativa nazionale si farà riferimento al Registro Italiano Navale (RINA), mentre, da un punto di vista internazionale, al Comitato Elettrotecnico Internazionale IEC e all'ente certificatore DNVGL.

Come da prospetto, l'analisi verterà sull'identificazione degli step di progettazione e verifica agli stati ultimi di tensione e a fatica e offrirà considerazioni sulle successive tecniche di calcolo dell'idrodinamica e delle sollecitazioni strutturali, che, in entrambi i casi dovranno essere supportate da metodi diretti.

1 Introduzione

Il PeWEC è un convertitore di energia del moto ondoso il cui principio di funzionamento è basato sul movimento di beccheggio dello scafo e la conseguente generazione di energia attraverso l'oscillazione di un pendolo connesso ad un generatore (PTO Power Take Off).

Il panorama normativo nazionale ed internazionale lascia spesso poco spazio al processo di progettazione e di classificazione dei convertitori di energia marina.

In Italia la normativa presa in considerazione è principalmente quella emanata dal Registro Italiano Navale (RINA), che, nonostante sia attualmente la normativa più diffusa per il settore navale in Italia, non prevede il caso di Wave Energy Converter. In questo caso, per essere inclusi nella classificazione RINA

[1] RINA PartA, ci si rifà alle *Unità non autopropulse*

[1] RINA PartA distinguibili in:

- Pontoon (Pontone)
- Barge (Chiatta)

Tecnicamente i Pontoni sono navi non autopropulse dotate di macchinari per sollevamento posti sul ponte; resta quindi una lacuna normativa che non ci permette di identificare una notazione adeguata da poter assegnare a PeWEC.

L'analisi degli standard è stata poi allargata al caso delle normative internazionali. Vista la grande quantità di normative emanate dalle differenti istituzioni e società internazionali, si è scelto di dare spazio nell'analisi alle norme e standards di Det Norske Veritas Germanischer Lloyd (DNV GL), la società di classificazioni più grande al mondo con linee di business specifiche nel settore delle rinnovabili offshore, e all'International Electrotechnical Commission (IEC), un'organizzazione internazionale che definisce gli standard e un sistema di classificazione specifici per i convertitori di energia delle onde.

In generale, la metodologia di analisi applicata è sintetizzabile in una serie di passaggi obbligati:

- studio della normativa con particolare attenzione alla corretta classificazione del dispositivo PEWEC;
- analisi delle formulazioni impiegate dallo standard considerato, qualora presenti, per il calcolo delle pressioni agenti sullo scafo
- verifica delle metodologie applicate in termini di:
 - Analisi degli stati tensionali ultimi;
 - Analisi a fatica.

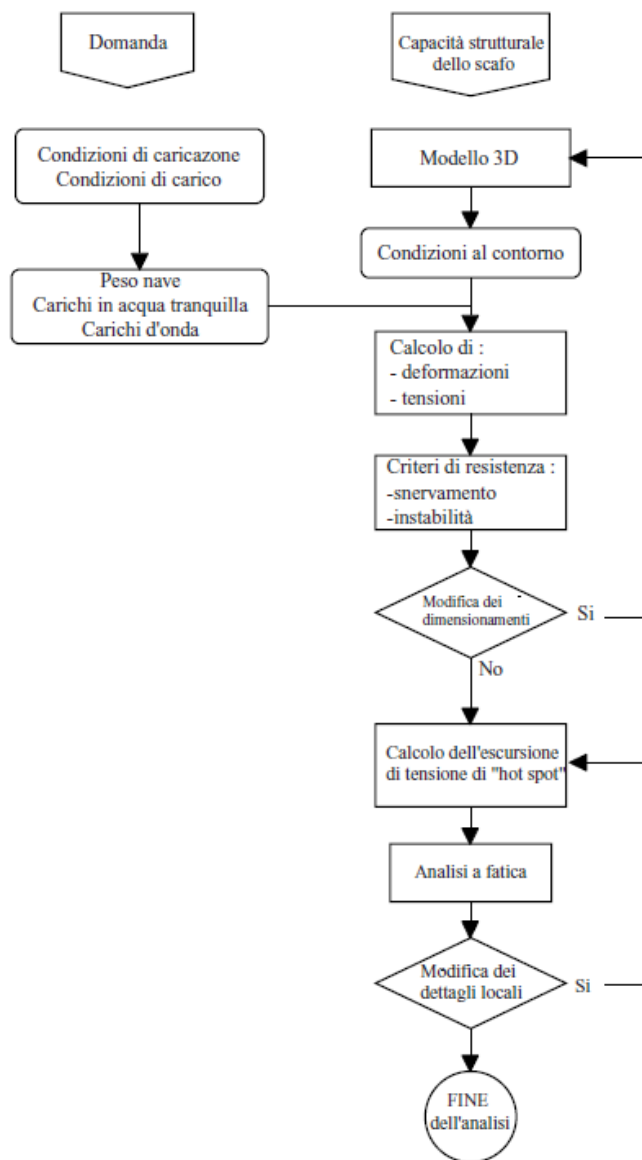
2 Normativa nazionale: RINA

Le prescrizioni specifiche per il progetto di unità con tali caratteristiche sono fornite in [3] RINA PartE (Cap. 19) per quello che è il focus della nostra trattazione, per il dimensionamento di fasciame, rinforzi ordinari, travi rinforzate e ponte si viene reindirizzati alla parte B (Cap 7) della normativa [2] RINA PartB.

2.1 Dimensionamento

Il dimensionamento delle unità non autopropulse che hanno caratteristiche geometriche dissimili dalle altre navi e carichi concentrati in aree limitate, devono essere soggetti a progettazione diretta [3] RINA PartE. Questo è il caso di PeWEC, unità che presenta una forma inusuale in ambito navale e un basso rapporto Lunghezza/Larghezza. A merito di ciò la norma nazionale si allinea con quanto richiesto da quella internazionale dove analogamente il dimensionamento diretto è richiesto attraverso dei modelli strutturali come indicato nel capitolo 3.

Figura 1 - Procedura di analisi tridimensionale [2] RINA PartB



La progettazione diretta è descritta da [2] RINA PartB (Cap.7 App. 1) ed il workflow da seguire è visibile nella *Figura 1 - Procedura di analisi tridimensionale [2] RINA PartB*. Il modello di analisi richiesto è un modello ad elementi finiti tridimensionale con l'utilizzo di una schematizzazione fine per tutti i punti nei quali ci possano essere accumuli di tensione.

Si precisa che tutti gli spessori calcolati per mezzo della normativa RINA sono considerati come *spessori netti*, ovvero spessori che non tengono conto della corrosione durante la design life del dispositivo.

2.2 Carichi

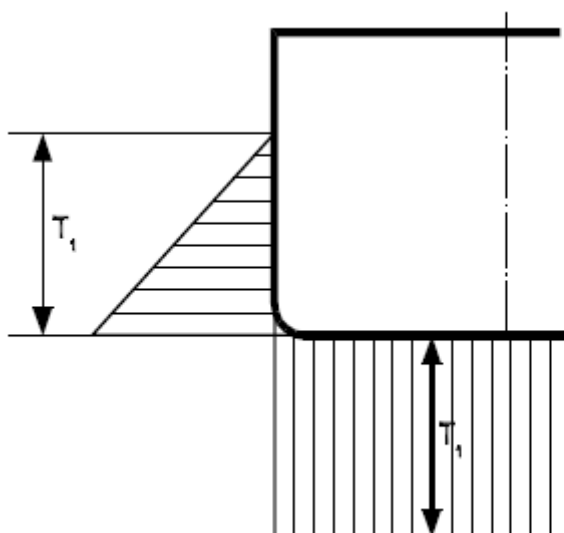
Nello sviluppo del modello tridimensionale, la norma RINA distingue i carichi in varie tipologie:

- Peso proprio della struttura
- Pressioni del mare
 - Pressioni del mare in acqua tranquilla
 - Pressioni d'onda
- Carichi distribuiti
- Carichi concentrati

I carichi dovuti al peso della struttura ed alle zavorre della stessa devono essere distribuiti uniformemente sulla struttura, in modo da ottenere un verosimile momento flettente in acqua tranquilla.

I carichi del mare si distinguono in carichi in acqua tranquilla ed in carichi d'onda.

Figura 2 - Pressioni del mare in acqua tranquilla [2] RINA PartB



Le pressioni del mare in acqua tranquilla (evidenziate in *Figura 2 - Pressioni del mare in acqua tranquilla [2] RINA PartB*) sono così descritte:

$$\rho g(T_1 - z)$$

Per quanto concerne invece il caso di pressione derivante da carico d'onda, la norma RINA fa riferimento a due casi, ampiamente descritti nel RINA 2005 PartB Cap.5 Sez.5. che suddividono il calcolo della pressione nel caso di nave dritta e nel caso di nave inclinata.

Figura 3 - Pressioni d'onda nella condizione di carico "a" [2] RINA PartB

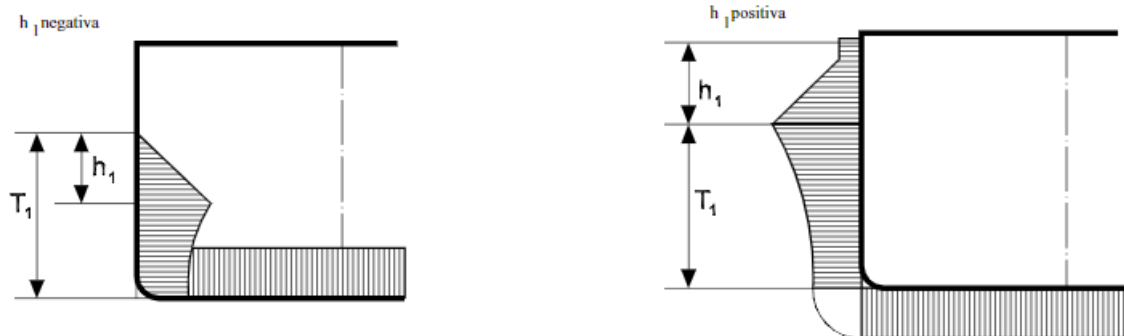


Figura 4 - Pressioni d'onda nella condizione di carico "b" [2] RINA PartB

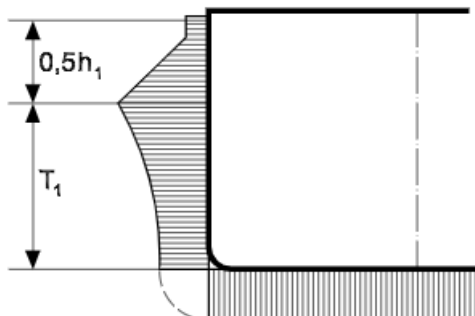


Figura 5 - Pressioni d'onda nella condizione di carico "c" [2] RINA PartB

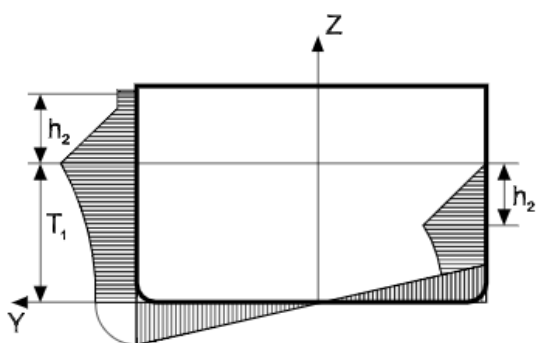
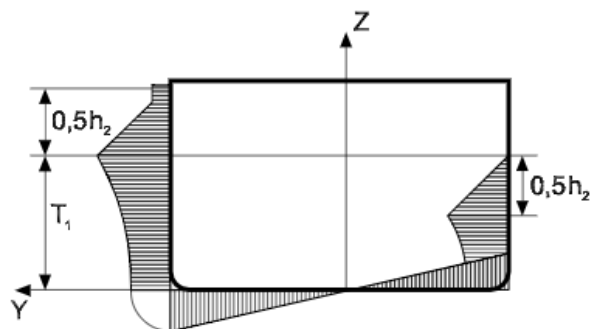


Figura 6 - Pressioni d'onda nella condizione di carico "d" [2] RINA PartB



I casi mostrati sopra vengono utilizzati per il calcolo delle pressioni nel caso delle strutture in acciaio. Le formule che consentono il calcolo delle pressioni sono descritte in RINA PartB ([2] RINA PartB Cap.7 App.1 e consentono appunto il calcolo delle pressioni in kN/m².

Tabella 1 - Pressioni d'onda a nave dritta [2] RINA PartB.

Posizione	Pressione d'onda p_w , in kN/m ²	C_1	
		cresta	cavo (1)
Fondo e fianchi sotto il galleggiamento con $z \leq T_1 - h$	$C_1 \rho g h e^{\frac{-2\pi(T_1 - z)}{\alpha L}}$	1,0	-1,0
Fianchi sotto il galleggiamento con $T_1 - h < z \leq T_1$	$C_1 \rho g h e^{\frac{-2\pi(T_1 - z)}{\alpha L}}$	1,0	$\frac{z - T_1}{h}$
Fianchi sopra il galleggiamento $z > T_1$	$C_1 \rho g (T_1 + h - z)$	1,0	0,0
<p>(1) La pressione d'onda per la condizione di carico "b, cavo" deve essere considerata solo per la verifica a fatica dei dettagli strutturali.</p> <p>Nota 1: $h = \alpha^{1/4} C_{F1} h_1$ C_{F1} : Coefficiente di combinazione, da assumere uguale a: <ul style="list-style-type: none"> • $C_{F1} = 1,0$ per la condizione di carico "a" • $C_{F1} = 0,5$ per la condizione di carico "b". </p>			

Tabella 2 - Pressioni d'onda a nave inclinata [2] RINA PartB.

Posizione	Pressione d'onda p_w , in kN/m ²	C_2 (angolo di rollio negativo)	
		$y \geq 0$	$y < 0$
Fondo e fianchi sotto il galleggiamento con $z \leq T_1 - h$	$C_2 C_{F2} \alpha^{1/4} \rho g \left[\frac{y}{B_W} h_1 e^{\frac{-2\pi(T_1 - z)}{\alpha L}} + A_R y e^{\frac{-\pi(T_1 - z)}{\alpha L}} \right]$	1,0	1,0
Fianchi sotto il galleggiamento con $T_1 - h < z \leq T_1$	$C_2 C_{F2} \alpha^{1/4} \rho g \left[\frac{y}{B_W} h_1 e^{\frac{-2\pi(T_1 - z)}{\alpha L}} + A_R y e^{\frac{-\pi(T_1 - z)}{\alpha L}} \right]$	1,0	$\frac{T_1 - z}{h}$
Fianchi sopra il galleggiamento $z > T_1$	$C_2 \rho g \left[T_1 + C_{F2} \alpha^{1/4} \left(\frac{y}{B_W} h_1 + A_R y \right) - z \right]$	1,0	0,0
<p>Nota 1: $h = \alpha^{1/4} C_{F2} h_2$ C_{F2} : Fattore di combinazione, da assumere uguale a: <ul style="list-style-type: none"> • $C_{F2} = 1,0$ per la condizione di carico "c" • $C_{F2} = 0,5$ per la condizione di carico "d". B_W : Larghezza fuori ossatura, in m, misurata sulla linea di galleggiamento all'immersione T_1, nella considerata sezione trasversale della nave A_R : Ampiezza di rollio, definita in Cap 5, Sez 3, [2.4.1].</p>			

Si tiene nuovamente a specificare che i carichi in descritti dalle tabelle sopra devono essere inseriti in un'analisi strutturale ai fini del dimensionamento e del calcolo dello spessore minimo.

2.3 Carichi degli ormeggi

Per quanto riguarda gli ormeggi, per le unità non dotate di propulsione e senza uomini a bordo, i dettagli sull'armamento marinaresco non sono richiesti ai fini della classificazione, ma restano alla responsabilità del progettista. Per quanto riguarda il dimensionamento delle strutture del ponte atte a resistere al carico degli armamenti marinareschi, esso è descritto nel [2] RINA PartB RINA PartB Cap.10 Sez.4.

2.4 Analisi di fatica

La verifica degli stati ultimi di tensione in un progetto strutturale non si può porre come punto di arrivo nel ciclo di progetto di un Wave Energy Converter (WEC); esistono infatti dei componenti soggetti a particolari condizioni di carico che si ripetono ciclicamente e che necessitano di un approfondimento ulteriore riguardo ai loro limiti di fatica.

La normativa di classificazione del RINA ([2] RINA PartB, Cap. 7 sez 4) prescrive l'analisi di fatica per tutti gli "hot spots", ovvero i punti dei dettagli strutturali in cui si possono verificare cricche per fatica, in particolare:

- Giunzioni Saldate;
- Dettagli strutturali speciali relativi a "Navi con fianchi a struttura longitudinale".

Una volta identificati i siti interessati dall'analisi, si prosegue con l'identificazione, come da norma, delle tensioni coinvolte in tali punti. Esse si distinguono in:

- Tensione nominale: tensione che risente delle variazioni della macro-geometria del componente;
- Tensione di "hot-spot": tensione locale nell'"hot-spot" dovuta alle discontinuità geometriche locali;
- Tensione di "notch": tensione di picco nel "notch".

Per procedere con l'analisi, è necessario calcolare l'escursione di tensione dove la norma precisa che, nel caso particolare degli hotspot, essa viene moltiplicata per un ulteriore coefficiente moltiplicativo di concentrazione delle tensioni.

L'escursione di tensione elementare ottenuta va utilizzata nelle verifiche di tensione, come ad esempio la verifica di tensione di notch riportata di seguito:

$$\Delta\sigma_{Neq} \leq \frac{\Delta\sigma_{PO}}{\gamma^{\frac{1}{3}}}$$

3 Normativa Internazionale

Gli organismi internazionali di standardizzazione di interesse per l'industria dell'energia rinnovabile sono l'Organizzazione Internazionale per la Standardizzazione (ISO) e la Commissione Elettrotecnica Internazionale (IEC).

L'IEC è l'organizzazione riconosciuta a livello internazionale per lo sviluppo di standard tecnici specifici per tutte le tecnologie elettriche, elettroniche e correlate, tra cui i sistemi di energia rinnovabile.

Nel 2014 è stato creato IECRE, il sistema IEC per la certificazione degli standard relativi alle apparecchiature per l'uso nelle applicazioni di energia rinnovabile, riconoscendo l'importanza di applicazione di standards in questo settore. IECRE affronta i requisiti specifici del settore che non risultano considerati nei sistemi di valutazione della conformità IEC esistenti.

L'IEC è suddiviso in diversi gruppi e sottogruppi, denominati rispettivamente Comitati Tecnici e Gruppi di Lavoro, che collaborano per la standardizzazione di tecnologie specifiche. I sistemi di energia rinnovabile sono divisi per risorsa energetica e lo IEC TC 114 [1] fornisce standard e specifiche che possono essere adattati al caso dei convertitori di energie marine. Molte di esse sono state approvate e si trovano in diversi stati di preparazione.

DNVGL è la società di classificazione più grande al mondo con sede in Norvegia, nata dalla fusione della società di classificazione norvegese (Det Norske Veritas) e quella tedesca (Germanischer Lloyd).

Lo standard DNVGL applica anch'esso un iter di certificazione che prevede un primo approccio basato sull'accREDITAMENTO, passaggio atto a verificare il background di competenze da parte dell'attore principale. Successivamente, viene presa in considerazione la documentazione prodotta, da norma, e riportata in DNVGL – GC – 0550.

Gli ultimi passi, nel processo di certificazione DNVGL constano di una serie di visite pianificate, da parte degli ispettori, che si concludono con la certificazione del dispositivo, la quale viene sottoposta a rinnovi periodici.

In continuità con quanto fatto all'interno della normativa nazionale, anche l'analisi degli standard internazionali verterà sull'identificazione degli stati di carico agenti sul dispositivo PEWEC in relazione non soltanto delle sollecitazioni ambientali ma anche di quelle derivanti dall'ormeggio e dal pendolo.

La normativa IEC identifica al suo interno l'oggetto specifico di Wave Energy Converter, e quindi segue un percorso di progettazione richiesta ai fini della classificazione diverso dalla normativa RINA.

Ai fini della comparazione si è cercato di rendere il processo quanto più simile e di facile intuizione ma è necessario ai fini di una migliore comprensione specificare alcuni dettagli della norma figli della IEC TC 114.

Le norme definite dal IEC TC 114 per i convertitori di energia delle onde suddivide i carichi in base alla loro tipologia e natura e vengono analizzati diverse possibilità di stati. Per stati si intende un'attività (come quella di manutenzione o installazione) oppure un avvenimento meteorologico (onda estrema) oppure ancora un guato (caso accidentale). Questi stati vengono utilizzati per scegliere la combinazione dei carichi e delle pressioni agenti sul dispositivo. Quindi i carichi d'onda non sono figli di formulazioni come nel caso del RINA ma seguono un discorso diverso che passa dalla scelta del sito fino all'uso di diversi programmi di analisi numerica per il calcolo delle pressioni.

In Tabella 3 si riportano nel dettaglio le norme specifiche per ogni aspetto della progettazione di un wave energy converter (WEC), definite dal TC114.

Tabella 3 - IEC TC114, process

IEC TC 114							
Nome normativa	IEC/TS 62600-2	IEC/TS 62600-10	IEC/TS 62600-x	IEC/TS 62600-200	IEC/TS 62600-30	IEC/TS 62600-40	IEC/TS 62600-201
Oggetto	Design Requirments	Moorings	Loads Measurement	Performance Assessment	Power Quality	Acoustics	Resource Assessment

Altri dettagli sono reperibili da documenti IEC [6] e dai report [7].

3.1 Condizione di Carico

La condizione di carico a cui è sottoposto un Wave Energy Converter durante tutta la sua vita operativa è non solo estremamente variabile, in quanto dipendente fortemente dalla posizione geografica, ma anche decisamente complessa. Infatti, il carico totale agente non è altro che una miscellanea di contributi sia interni, sollecitazioni del PTO ad esempio, sia esterni, azione delle onde.

In generale, i carichi sono suddivisibili in:

- Permanenti (G):
 - Strutture, zavorre ed equipaggiamenti.
 - Pressioni idrostatiche.
- Variabili (Q):
 - Zavorre liquide.
 - Carichi del PTO (o Pendolo).

- Carichi dovuti alle operazioni di installazione.
- Carichi di ormeggio.
- Carichi ambientali (E):
 - Sollecitazioni dovute a onde, vento e correnti.
 - Ghiaccio, terremoti, ecc.
- Carichi di deformazione (D):
 - Carichi termici.
 - Pretensionamento delle linee di ormeggio.

Alcuni carichi possono essere trascurabili in una prima fase di progettazione: verranno considerati, ai fini di questa analisi, i carichi permanenti, variabili e ambientali.

3.2 Standard: Condizioni di Progetto

Tutte le sollecitazioni causate da azioni interne (pendolo, masse in rotazione, zavorre, liquidi in movimento) o dai carichi esterni (tensione delle linee di ormeggio, carichi d'onda, carichi di vento, carichi dovuti all'azione delle correnti) devono essere considerate.

Le condizioni di progetto devono essere verificate secondo le seguenti categorie:

Table 4 - Stati di Progetto

Categorie	Situazione
Stato Operativo	Normali condizioni operative (analisi di fatica)
Stati Estremi	Condizioni di carico estreme (50 anni di periodo di ritorno)
Stati Accidentali	Situazioni derivanti dal danneggiamento di uno o più componenti (linee di ormeggio, pendolo, ecc.) con stati estremi.
Stato di Installazione e Manutenzione	Fase di installazione e manutenzione

Lo stato operativo indicato in Tabella 4, si riferisce alle normali condizioni operative in cui il dispositivo si trova nella maggior parte della sua vita operativa. Relativamente a questa fase di design, è necessario includere l'analisi di fatica per qualunque dispositivo la cui vita operativa superi i 5 anni. Inoltre, l'analisi di fatica deve anche tenere conto della corrosione.

Riguardo gli stati estremi indicati precedentemente, la normativa IEC TS 62600-2 prescrive di considerare la combinazione delle forzanti esterne di origine ambientale nel loro caso peggiore, sottolineando la necessità di considerare diversi periodi di ritorno. Gli stati accidentali invece, si riferiscono a condizioni di stato di mare accidentali, in cui si verifica la rottura di un componente. Le rotture possono verificarsi per il sistema di estrazione di potenza, le linee di ormeggio, ecc.

In ultimo, gli stati di installazione e manutenzione si riferiscono alla sopravvivenza del dispositivo nelle fasi di installazione, manutenzione e dismissione.

3.3 Stati Estremi

Gli stati estremi esprimono le condizioni di carico a cui è sottoposto il dispositivo in condizioni di tempesta ed in questa situazione tutti i carichi agenti sul dispositivo devono essere debitamente considerati. L'azione interna predominante, nel caso del dispositivo PEWEC, è rappresentata dall'oscillazione del pendolo.

In generale, tutti i componenti che possono determinare stati di sollecitazione sul dispositivo, devono essere considerati ed inclusi nel novero delle azioni interne.

Come è noto, gli stati estremi si configurano come un'azione eccezionale dei carichi ambientali, le cui sollecitazioni derivanti sono amplificate dagli stati di mare tempestosi. In generale, questi dipendono fortemente dalla posizione geografica del dispositivo. In questa analisi si tiene in considerazione unicamente l'azione delle onde, delle correnti e del vento.

3.4 Carichi degli ormeggi

I carichi degli ormeggi vengono considerati nei carichi variabili e le strutture dello scafo devono essere dimensionate di conseguenza. Nel caso delle normative descritte, il calcolo delle forze d'ormeggio non è lasciato al progettista ma è normato dettagliatamente in [5] DNV-OS-E301[4] IEC TS 62600-10.

3.5 Design delle strutture in acciaio

Quanto espresso precedentemente non rappresenta altro che una sintesi delle varie condizioni di carico a cui può essere sottoposto un WEC durante la sua vita operativa. Tuttavia, ai fini della progettazione strutturale è necessario inserire dei criteri di verifica di resistenza tali da poter affermare la solidità del dispositivo allo stato ultimo di tensione, a snervamento e instabilità, e a fatica.

La norma IEC TS 62600-2 invece sottolinea come poter dimensionare correttamente a ULS (Ultimate Limit State) il dispositivo mediante il metodo di load and resistance factor, dettagliato nel seguito.

3.6 Coefficiente di carico e di resistenza

Il metodo di load and resistance factor design (LRFD) considera tutti gli effetti di variazioni randomiche sia della resistenza del materiale, sia del carico applicato. Il metodo impone che la verifica di resistenza soggiaccia a:

$$S \leq R$$

In cui S è l'effetto del carico di design, mentre R è la resistenza di design.

Gli effetti del carico di design devono essere calcolati considerando una combinazione dei vari carichi di design ($F_{d,1} \dots F_{d,n}$), i quali sono calcolati a partire dai carichi caratteristici F_k . In sostanza, in una considerazione più generale, l'effetto del carico di design deve essere inferiore alla resistenza di design. Tuttavia, la resistenza di design, nella forma precedentemente espressa, è scevra da considerazioni sul materiale da costruzione (acciaio in questo specifico caso acciaio), che vengono implementate con:

$$R_d = \Phi R_k$$

In cui:

R_k = resistenza caratteristica;

Φ = fattore di resistenza.

A sua volta, il fattore di resistenza sintetizza la geometria del componente con il materiale di costruzione, per cui:

$$\Phi = \frac{1}{\gamma_M}$$

Per quanto riguarda la caratterizzazione dello stato limite di tensione, la norma IEC TS 62600-2 raccomanda che in ogni caso le analisi possono essere lineari elastiche, per il dimensionamento statico, o elasto-plastiche. Data la natura del carico agente, inteso come combinazione di molteplici effetti, e la complessità del sistema del Wave Energy Converter, la norma prescrive l'utilizzo di simulazioni strutturali.

3.7 Analisi di fatica

A valle della verifica strutturale del dispositivo, sia a carico statico, sia a instabilità, è necessario analizzare il comportamento a fatica di elementi saldati avvalendosi delle ipotesi di danneggiamento lineare.

In generale è necessario costruire una curva sollecitazione/numero di cicli dei dettagli critici, a valle di una sperimentazione adeguata. Inoltre, è possibile avvalersi della teoria della meccanica della frattura tenendo in debito conto la teoria di propagazione della cricca e pianificando adeguatamente il piano di manutenzione.

Come già descritto precedentemente, l'analisi di fatica deve investigare il comportamento a fatica delle saldature o di particolari strutturali caratterizzati da concentrazione di stress, dovuta o a carichi ciclici elevati o a geometrie a raggio di curvatura ridotto. In ogni caso, si fa riferimento alla norma ISO 19902.

In ultimo, è possibile applicare un fattore di fatica di progetto (DFF), che deve essere applicato alla vita a fatica di progetto stimata, al fine di diminuire la probabilità di danneggiamento per fatica.

4 Conclusioni

Il report riassume il lavoro effettuato in fase di progettazione del dispositivo PeWEC, volto ad evidenziare la metodologia da seguire per soddisfare gli standards nazionali del settore.

Ciascuna delle norme nazionali ed internazionali analizzate mostra l'evidente necessità di un calcolo diretto per il dimensionamento degli spessori del fasciame dello scafo.

Lo standard italiano è molto dipendente dalle scelte dello standard RINA, che può quindi richiedere analisi approfondite non perfettamente descritte dalla norma, e che consente di definire un processo di design solo caso per caso.

L'analisi dei carichi dovuti agli stati di mare, nonché alla definizione degli stessi, è molto più precisa e definita nelle norme internazionali ed è coerente nel caso di dispositivo ormeggiato per lungo periodo di tempo e con la necessità della tenuta di mare.

Essendo quindi, secondo normativa RINA, responsabilità del progettista il dimensionamento dell'ormeggio, per tale processo diventa necessario prendere in considerazione norme internazionali.

Vista la carenza di una classificazione adeguata da parte della normativa nazionale, nel caso di progettazione full-scale, sarebbe consigliabile seguire dunque la metodologia proposta da IEC.

Per quanto riguarda il calcolo dell'idrodinamica del dispositivo, oltre ad essere prescritto un calcolo mediante metodi numerici, il calcolo delle pressioni nelle condizioni operative esula dallo scopo del presente documento.

Lo spessore minimo accettabile, come precedentemente espresso e concordemente con tutte le normative esaminate, verrà calcolato mediante analisi diretta basata sul metodo a elementi finiti (FEM) in fasi successive del progetto.

5 Bibliografia

- [1] RINA PartA
- [2] RINA PartB
- [3] RINA PartE
- [4] IEC TS 62600-10
- [5] DNV-OS-E301
- [6] IEC TC114 – Strategic Business Plan
- [7] MET-Certified Workshop

6 Appendice

Il centro ricerche Marine Offshore Renewable Energy (MORELab) nasce presso il Politecnico di Torino e rappresenta il frutto dell'esperienza maturata da parte del Politecnico nel campo dell'energia marina.

Il gruppo, altamente interdisciplinare, conta ad oggi più di 50 persone tra ricercatori a tempo indeterminato e determinato, dottorandi, e assegnisti che costituiscono il motore propulsivo del Centro.

Le principali attività del Centro riguardano lo sviluppo di metodologie per l'analisi, lo sviluppo e il test di tecnologie per la produzione di energia dal mare con attività relative a Progettazione, Modellazione Numerica, Sviluppo di Sistemi di Controllo, Test in Vasca Prova e in Mare Aperto.

A oggi, i focus particolari riguardano:

- Wave Energy
- Off-shore Wind Energy
- Piattaforme energetiche multifunzionali
- Energy Storage

Le competenze del MORE riguardano:

- analisi della risorsa marina/eolica
- applicazione di competenze relative allo studio di idrodinamica di corpi galleggianti soggetti a moto ondoso e correnti (con tecniche di modellazione lineare e non, integrate ad analisi CFD)
- sviluppo e progettazione dei sistemi elettromeccanici di conversione
- applicazione di metodologie per il controllo dei sistemi (PID, Controllo Ottimo, LQR, Fuzzy, MPPT, MPC, Data driven etc.)
- progettazione e ottimizzazione di sistemi di ormeggi
- interfacciamento del dispositivo ai sistemi di distribuzione di energia elettrica
- valutazione di accumuli per la gestione delle smart grid
- analisi di array di sistemi
- integrazione di RES tradizionali
- sviluppo di scenari energetici rivolto ad isole minori
- business model di comunità energetiche

La complessità endemica di queste tematiche necessita il coinvolgimento di numerose figure professionali fortemente interconnesse e supportate dalle tecnologie più performanti. A questo proposito, il Centro porta al suo interno competenze di modellazione numerica avanzata di sistemi energetici marini, la cui capacità predittiva e affidabilità viene moltiplicata dall'utilizzo delle tecnologie di HPC.

All'attività di modellazione numerica, il Centro affianca anche un'intensa attività sperimentale, frutto di un'esperienza quindicennale ad ampio spettro, che spazia dalle attività di testing su banchi prova basati sulla tecnologia Hardware in the Loop alle attività sperimentali in vasche prova nazionali e internazionali.

L'ecosistema del Centro, già collaudato nell'ambito dei Gruppi di Ricerca che lo animano, si caratterizza per una spiccata propensione alla collaborazione a più livelli, in particolar modo con gli stakeholders industriali del panorama energetico e con numerosi partners nazionali e internazionali, coinvolti anche nelle facilities a disposizione del Centro.

Selezione di Pubblicazioni:

- ✓ Di Muro, A., Sirigu, S.A., Giorgi, G., Gerboni, R., Bracco, G., Carpignano, A., Mattiazzo, G., Life Cycle Assessment for the ISWEC Wave Energy Device, (2021) Mechanisms and Machine Science, 91, pp. 515-523.

- ✓ Giorgi, G., Gomes, R.P.F., Henriques, J.C.C., Gato, L.M.C., Bracco, G., Mattiazzo, G., Detecting parametric resonance in a floating oscillating water column device for wave energy conversion: Numerical simulations and validation with physical model tests, (2020) *Applied Energy*, 276.
- ✓ Dafnakis, P., Bhalla, A.P.S., Sirigu, S.A., Bonfanti, M., Bracco, G., Mattiazzo, G., Comparison of wave-structure interaction dynamics of a submerged cylindrical point absorber with three degrees of freedom using potential flow and computational fluid dynamics models, (2020) *Physics of Fluids*, 32 (9).
- ✓ Mattiazzo, G., State of the Art and Perspectives of Wave Energy in the Mediterranean Sea: Backstage of ISWEC, (2019) *Frontiers in Energy Research*.
- ✓ Buscaino, G., Mattiazzo, G., Sannino, G., Papale, E., Bracco, G., Grammauta, R., Carillo, A., Kenny, J.M., De Cristofaro, N., Ceraulo, M., Mazzola, Acoustic impact of a wave energy converter in Mediterranean shallow waters, (2019) *Scientific Reports*, 9 (1).
- ✓ Bracco, G., Giorcelli, E., Mattiazzo, G., ISWEC: A gyroscopic mechanism for wave power exploitation (2011) *Mechanism and Machine Theory*, 46 (10), pp. 1411-1424.