



Ricerca di Sistema elettrico

## Metodologia progettuale del sistema di conversione “passivo”

G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi,  
E. Giovannini, A. Fontanella

## PROGETTAZIONE E COSTRUZIONE DEL SISTEMA DI CONVERSIONE IN SCALA INTERMEDIA

G. Bracco, E. Giorcelli, G. Mattiazzo, N. Pozzi (Politecnico di Torino)  
E. Giovannini, A. Fontanella (ENEA)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso

Obiettivo: Progettazione ed esecuzione delle prove su di un prototipo in scala di dispositivo point absorber "passivo" per il recupero di energia da moto ondoso

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Progettazione e sperimentazione in vasca di un modello in scala 1:12 di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso"

Responsabile scientifico ENEA: Gianmaria Sannino

Responsabile scientifico Politecnico di Torino: Prof. Giuliana Mattiazzo

## Indice

SOMMARIO.....	6
1 INTRODUZIONE.....	7
2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO.....	7
3 MODELLO MATEMATICO.....	10
3.1 SIMBOLI UTILIZZATI NEL MODELLO DI CALCOLO.....	10
3.2 EQUAZIONI NON-LINEARI DELLA DINAMICA DEL SISTEMA.....	10
3.3 EQUAZIONI LINEARI DELLA DINAMICA DEL SISTEMA.....	11
3.4 IDRODINAMICA DELLO SCAFO.....	12
4 METODOLOGIE DI PROGETTAZIONE.....	13
5 RISORSA ENERGETICA.....	13
5.1 DEFINIZIONE DEL SITO DI RIFERIMENTO.....	13
5.2 ALGHERO.....	13
5.3 PANTELLERIA.....	15
5.4 CARATTERISTICHE DELLA VASCA DI PROVA.....	16
5.5 SPECIFICHE DELL'INFRASTRUTTURA.....	17
5.6 SERVIZI OFFERTI.....	18
5.7 SCALATURA.....	19
6 LA PROGETTAZIONE DELLO SCAFO.....	20
6.1.1 <i>Geometria</i> .....	20
6.1.2 <i>Studio parametrico della geometria</i> .....	21
6.1.3 <i>Scelta dei parametri</i> .....	21
7 LA PROGETTAZIONE DEL PENDOLO.....	23
7.1.1 <i>Pendolo fisico</i> .....	23
7.1.2 <i>Progettazione della massa oscillante</i> .....	24
7.1.3 <i>Analisi configurazione ovale</i> .....	26
7.1.4 <i>Verifica strutturale</i> .....	27
7.1.5 <i>Analisi modale</i> .....	28

## Elenco delle figure

Figura 1 - Schema qualitativo PEWEC.....	7
Figura 2 - I moti dello scafo .....	8
Figura 3 - Schema principio di funzionamento PEWEC .....	8
Figura 4 - Schema semplificato del PEWEC, completo dei suoi sistemi di riferimento .....	9
Figura 5 - Scatter di Alghero (Dati RON, $H_s-T_p$ ) .....	14
Figura 6 - Scatter di Alghero (Dati RON, $H_s-T_m$ ) .....	14
Figura 7 - Scatter di Alghero (dati ENEA).....	15
Figura 8 - Scatter di Pantelleria (da AWAC, 2010, file "ST_Pantelleria.mat") .....	16
Figura 9 - Bacini rettilinei presso INSEAN (n° 1 a destra, n° 2 a sinistra).....	16
Figura 10 - Schema semplificato dello scafo e della geometria della porzione sommersa .....	20
Figura 11 – Variazione della risposta in frequenza al variare dell’inerzia dello scafo (condizione nominale linea azzurra) .....	22
Figura 12 - Pendolo fisico .....	23
Figura 13 - Complessivo pendolo .....	24
Figura 14 - Configurazione a disco.....	25
Figura 15 - Configurazione a semi-disco.....	25
Figura 16 - Configurazione ovale .....	26
Figura 17 - Caratteristica periodo di risonanza del pendolo al variare della sua lunghezza .....	26
Figura 18 - Verifica strutturale FEM del pendolo .....	27
Figura 19 - Verifica a deformazione del pendolo .....	27
Figura 20 - Risultato numerico relativo alla prima frequenza naturale identificata con l'analisi modale .....	28

## Elenco delle tabelle

Tabella 1 - Caratteristiche bacino n°2 INSEAN .....	17
Tabella 2 - Scalatura condizioni ondose dei siti di Alghero e Pantelleria .....	19
Tabella 3 - Caratteristiche onda di progetto, scala 1:12 rispetto alla condizione più energetica del sito di Pantelleria.....	19
Tabella 4 - Condizioni di prova in onda regolare .....	20
Tabella 5 - Parametri selezionati per lo studio parametrico dello scafo.....	21

## Sommario

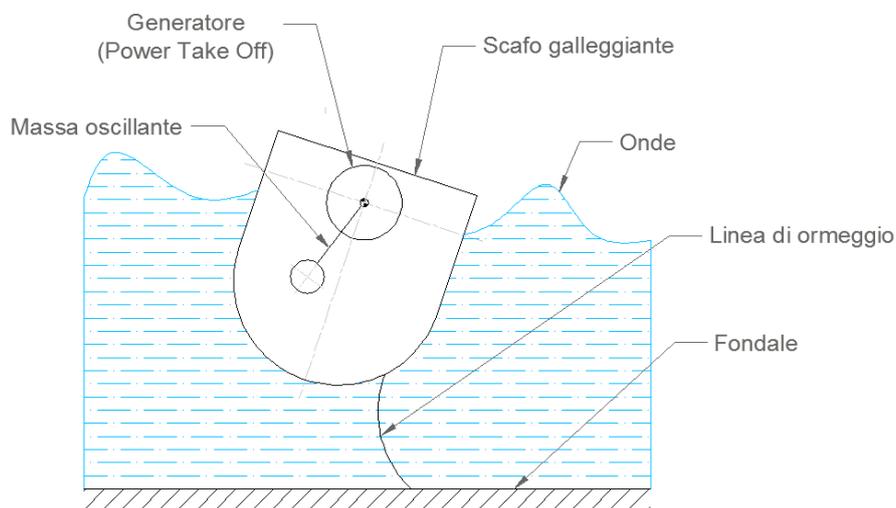
Il rapporto illustra le metodologie di progettazione del sistema PEWEC 1:12. Si descrive il sistema e la sua modellazione dinamica atta al dimensionamento del prototipo. Gli stati di mare di riferimento sono descritti ed analizzati in modo da definire le condizioni ondose in vasca e in ultima analisi le dimensioni tipiche del prototipo.

## 1 Introduzione

Il sistema PEWEC (Pendulum Wave Energy Converter) è costituito da uno scafo galleggiante, all'interno del quale è presente un pendolo in grado di oscillare rispetto alla sua cerniera. La cerniera è solidale allo scafo e in corrispondenza della medesima è installato un generatore elettrico (detto anche Power Take Off, PTO). Infine lo scafo è tenuto in posizione rispetto al fondale marino mediante una linea di ormeggio. Nel presente report sono descritte le metodologie di progetto del prototipo in scala 1:12.

## 2 Principio di funzionamento

In Figura 1 è riportato uno schema qualitativo del dispositivo.



**Figura 1 - Schema qualitativo PEWEC**

Per poter descrivere il principio di funzionamento del dispositivo è necessario considerare una rappresentazione piana del sistema, secondo la quale è possibile individuare i tre moti principali del galleggiante (si veda Figura 2):

- *Moto di avanzamento*, parallelo alla direzione dell'onda incidente;
- *Moto di sussulto*, ortogonale alla direzione di avanzamento;
- *Moto di beccheggio*, che corrisponde alla rotazione dello scafo intorno al suo baricentro  $G$ .

L'ipotesi di rappresentazione piana del dispositivo è dovuta al fatto che il sistema è concepito per essere sempre allineato rispetto alla direzione del fronte ondos.

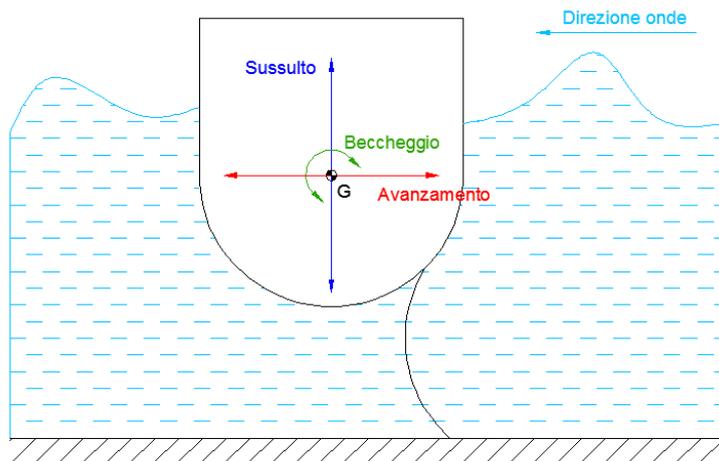


Figura 2 - I moti dello scafo

Le onde incidenti sullo scafo inducono il moto dello scafo del PEWEC secondo le direzioni di avanzamento, sussulto e beccheggio precedentemente descritte. La cerniera del pendolo A, che è solidale allo scafo, viene trascinata da quest'ultimo per effetto dei moti di avanzamento, sussulto e beccheggio; il moto della cerniera induce a sua volta l'oscillazione del pendolo, che viene sfruttata per azionare l'albero del generatore elettrico. In Figura 3 sono riportati due schemi che riassumono il principio di funzionamento del PEWEC.

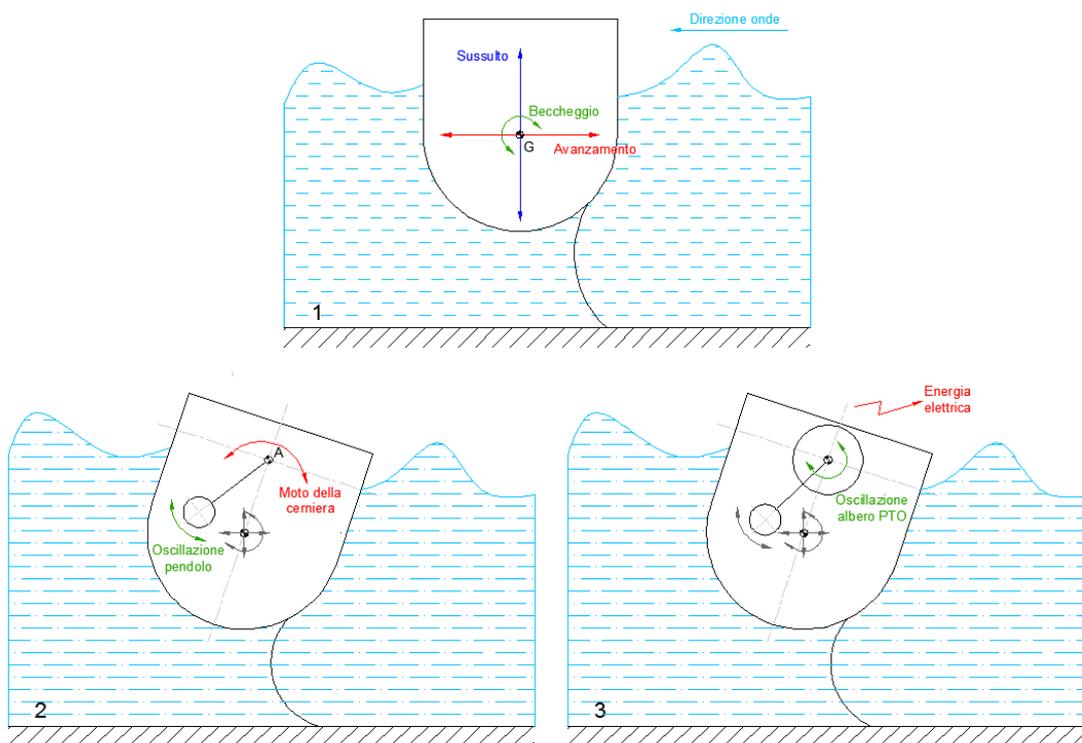
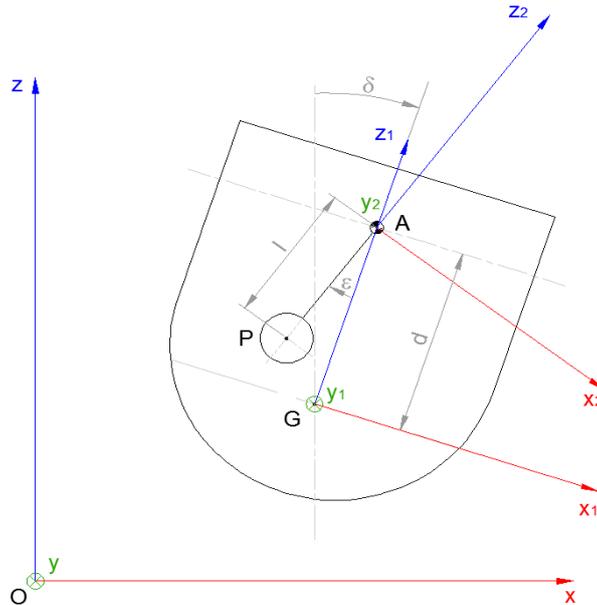


Figura 3 - Schema principio di funzionamento PEWEC

Infine in Figura 4 si riporta uno schema tecnico del sistema nel quale sono stati riportati i sistemi di riferimento e i parametri di maggiore interesse per la descrizione meccanica del sistema e che saranno utilizzati per la progettazione del sistema.

In particolare il punto  $G$  indica il centro di gravità dello scafo, il punto  $A$  la cerniera del pendolo e il punto  $P$  con il centro di gravità della massa del pendolo. Inoltre si definisce con  $l$  la lunghezza del pendolo, ovvero la distanza tra i punti  $A$  e  $P$ , mentre  $d$  è la distanza tra i punti  $A$  e  $G$ .



**Figura 4 - Schema semplificato del PEWEC, completo dei suoi sistemi di riferimento**

Inoltre si definisce con  $m_b$  la massa dello scafo e con  $I_b$  il suo momento di inerzia baricentrico, con  $m_p$  la massa del pendolo e con  $I_p$  il momento di inerzia della massa del pendolo, valutato rispetto al punto  $P$ .

Considerando ancora la Figura 4 è possibile individuare i seguenti sistemi di riferimento:

- $O$ - $x_1y_1z_1$ : sistema di riferimento fisso con origine in  $O$ ;
- $G$ - $x_1y_1z_1$ : sistema di riferimento dello scafo con origine coincidente con il suo baricentro  $G$ ;
- $A$ - $x_2y_2z_2$ : sistema di riferimento solidale con la massa oscillante, con origine coincidente con il punto  $A$ .

L'asse  $x$  è orientato lungo la direzione predominante delle onde, con direzione positiva opposta alla direzione di propagazione delle onde.

L'asse verticale  $z$  ha direzione positiva dal basso verso l'alto, mentre la direzione dell'asse  $y$  è determinata mediante la regola della mano destra. Di conseguenza è conveniente scegliere lo stesso orientamento per i sistemi di riferimento  $x_1, y_1, z_1$  e  $x_2, y_2, z_2$ .

Come accennato in precedenza la rappresentazione bidimensionale del sistema è basata sull'ipotesi di auto-allineamento dello scafo rispetto alla direzione dominante delle onde. In questo modo è possibile trascurare il moto del sistema lungo l'asse  $y$ .

Sotto questa ipotesi il moto dello scafo avviene nel piano  $O-xz$  e può essere descritto considerando il moto di avanzamento  $x_G$ , il moto di sussulto  $z_G$  e il moto di beccheggio  $\delta$  attorno all'asse  $y$ .

Infine il moto relativo tra lo scafo e il pendolo è individuato dalla coordinata angolare  $\varepsilon$ .

### 3 Modello matematico

#### 3.1 Simboli utilizzati nel modello di calcolo

$\overrightarrow{GO}$	coniungente tra la posizione del baricentro dello scafo e quella della cerniera del pendolo
$\overrightarrow{PO}$	coniungente tra la posizione della massa oscillante quella della cerniera del pendolo
$\overrightarrow{GP}$	coniungente tra la posizione del baricentro dello scafo e quella della massa oscillante
$R$	distanza tra la cerniera del pendolo e baricentro dello scafo
$L$	lunghezza del pendolo
$m$	massa del pendolo
$\delta$	angolo di inclinazione dello scafo rispetto alla verticale
$\varepsilon$	angolo della massa oscillante rispetto alla verticale
$T_P$	energia cinetica della massa oscillante
$I_S$	momento di inerzia della massa oscillante
$U_P$	energia potenziale della massa oscillante
$U_S$	componente rotatoria dell'energia potenziale della massa oscillante
$g$	accelerazione di gravità
$F_P$	energia dissipata per smorzamento viscoso del pendolo
$F_S$	energia dissipata per attrito tra scafo e acqua
$c_P$	coefficiente di attrito viscoso
$c_S$	coefficiente di attrito tra scafo e acqua
$M$	matrice di inerzia
$[A(\omega)]$	matrice di massa aggiunta
$[B(\omega)]$	matrice dei coefficienti di smorzamento aggiunto
$[K]$	matrice di rigidità
$\{F_E\}$	vettore delle forze esterne
$\{F_L\}$	vettore delle forze legate al moto ondoso
$\omega$	frequenza del moto ondoso
$\{x\}$	vettore degli spostamenti

#### 3.2 Equazioni non-lineari della dinamica del sistema

Le equazioni dinamiche non lineari del Pendulum Wave Energy Converter sono state derivate applicando l'approccio lagrangiano sui tre gradi di libertà dello scafo ( $x_G, z_G, \delta$ ) e sul grado di libertà interno al sistema

$\varepsilon$  associato al pendolo. Per la loro derivazione le azioni dell'idrodinamica non sono state prese in considerazione, infatti tali effetti verranno introdotti successivamente. Di seguito si riportano le equazioni non lineari della dinamica del sistema in forma matriciale (equazione (1)).

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{z}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{PTO} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{z}_G \\ \dot{\delta} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{PTO} \begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \mathbf{F}_{cor} + \mathbf{F}_{gr} \quad (1)$$

Dove  $\mathbf{M}$  è la matrice di massa,  $\mathbf{D}_{PTO}$  e  $\mathbf{K}_{PTO}$  sono rispettivamente la matrice di smorzamento e di rigidità associate all'azione del PTO.  $\mathbf{F}_{cor}$  è il vettore dell'azione di Coriolis che nasce per il fatto che la cerniera del pendolo si muove nello spazio, mentre  $\mathbf{F}_{gr}$  è il vettore dell'azione di gravità.

Le espressioni esplicite delle suddette matrici sono riportate di seguito:

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_p + m_b & 0 & m_p [d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)] & -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) \\ 0 & m_p + m_b & -m_p [d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) \\ m_p [d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)] & -m_p [d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] & I_y + I_b + m_p (d^2 + l^2) - 2 m d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon \\ -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{D}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{K}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{cor} = \begin{bmatrix} -m_p [l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \sin(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \sin \delta] \\ -m_p [l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \cos(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \cos \delta] \\ m_p d l \sin \varepsilon [(\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 - \dot{\delta}^2] \\ m_p d l \dot{\delta}^2 \sin \varepsilon \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{gr} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_p g [d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)] \\ -m_p g l \sin(\delta + \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (6)$$

### 3.3 Equazioni lineari della dinamica del sistema

Successivamente, considerando l'ipotesi di spostamenti angolari sufficientemente piccoli, le equazioni non lineari sono state linearizzate e dunque semplificate.

Il sistema di equazioni lineari che descrivono il comportamento della meccanica del Pendulum Wave Energy Converter sono le seguenti:

$$\mathbf{M}_{lin} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{z}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{D}_{PTO} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{z}_G \\ \dot{\delta} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{K}_{lin}^* \begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (7)$$

$$\mathbf{M}_{lin} = \begin{bmatrix} m_p + m_b & 0 & m_p(d-l) & -m_p l \\ 0 & m_p + m_b & 0 & 0 \\ m_p(d-l) & 0 & I_y + I_b + m_p(d-l)^2 & I_y + m_p l^2 - m_p d l \\ -m_p l & 0 & I_y + m_p l^2 - m_p d l & I_y + m_p l^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\mathbf{D}_{PTO} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\mathbf{K}_{lin}^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -m_p g (d-l) & m_p g l \\ 0 & 0 & m_p g l & k + m_p g l \end{bmatrix} \quad (10)$$

Dove  $\mathbf{M}_{lin}$  è la matrice di massa linearizzata,  $\mathbf{D}_{PTO}$  è la matrice di smorzamento associata all'azione del PTO,  $\mathbf{K}_{lin}^*$  è la matrice di rigidità che contiene sia l'effetto della gravità, sia la rigidità associata alla legge di controllo del PTO.

### 3.4 Idrodinamica dello scafo

La modellazione idrodinamica di uno scafo soggetto al moto delle onde marine è rappresentabile dalla seguente equazione matriciale:

$$([\mathbf{M}] + [\mathbf{A}(\omega)]) \cdot \{\ddot{x}\} + [\mathbf{B}(\omega)] \cdot \{\dot{x}\} + [\mathbf{K}] \cdot \{x\} = \{F_E\} + \{F_L\} \quad (17)$$

Dove M è la matrice di massa del dispositivo, A, la matrice di massa aggiunta e B la matrice dello smorzamento aggiunto, K è la matrice di rigidità idrostatica.  $F_E$  rappresenta il vettore delle forze di eccitazione che le onde esercitano sullo scafo e  $F_L$  il vettore delle forze esterne applicate sullo scafo. In questo caso le forze che il sistema oscillante scambia alla cerniera del pendolo. X è il vettore posizione dello scafo ed è definito come segue:

$$\{X\} = \begin{Bmatrix} X_G \\ Z_G \\ \delta \end{Bmatrix} \quad (18)$$

Nel caso di onde ideali di tipo armonico:

$$\{F_L\} = \{F_0\} H \cos \omega t \quad (14)$$

La definizione dei termini non lineari, come gli effetti della massa aggiunta e delle onde prodotte dallo scafo stesso ha richiesto l'utilizzo del software specialistico ANSYS AQWA. La risoluzione dell'equazione ha richiesto l'utilizzo di un metodo numerico standard implementato in ambiente MATLAB/Simulink.

## 4 Metodologie di progettazione

In questo paragrafo viene analizzata e discussa la procedura adottata per la progettazione di tutti i sistemi che compongono il prototipo PEWEC a partire dalla risorsa energetica utilizzata per il suo funzionamento. In particolare viene analizzata:

- La risorsa energetica;
- La progettazione dello scafo;
- La progettazione del pendolo.

## 5 Risorsa energetica

Il primo passo della progettazione riguarda lo studio della risorsa energetica, ovvero lo stato di mare di riferimento, rispetto al quale si esegue la progettazione del prototipo in scala.

I test sperimentali sul prototipo in scala vengono eseguiti in vasca navale e per questa ragione occorre considerare anche le capacità del sito di prova, il quale deve essere in grado di poter riprodurre gli stati di mare desiderati. Inoltre il prototipo andrà dimensionato anche rispetto alle dimensioni della struttura selezionata per i test sperimentali.

### 5.1 Definizione del sito di riferimento

I siti di riferimento nel Mar Mediterraneo che vengono considerati sono i seguenti:

1. *Alghero, Sardegna*: i dati presentati si riferiscono alla boa n° 1 della Rete Ondametrica Nazionale RON (40° 33' 11.99" N, 08° 07' 0.01" E) e dai dati derivati da simulazione ENEA. I dati possono essere reperiti sul sito [http://www.idromare.it/struttura\\_scheda.php?RON=1&pagina=scheda](http://www.idromare.it/struttura_scheda.php?RON=1&pagina=scheda);
2. *Pantelleria*: i dati relativi a questo sito derivano dalle acquisizioni dell'ondametro Nortek – AWAC, posizionato ad una profondità 31 m e alla coordinate 36° 50' 0" N, 11° 57' 0" E.

### 5.2 Alghero

In Figura 5 e in Figura 6 viene riportata la scatter del sito di Alghero ottenuta a partire dai dati RON che però non sono stati utilizzati per la seguente trattazione.

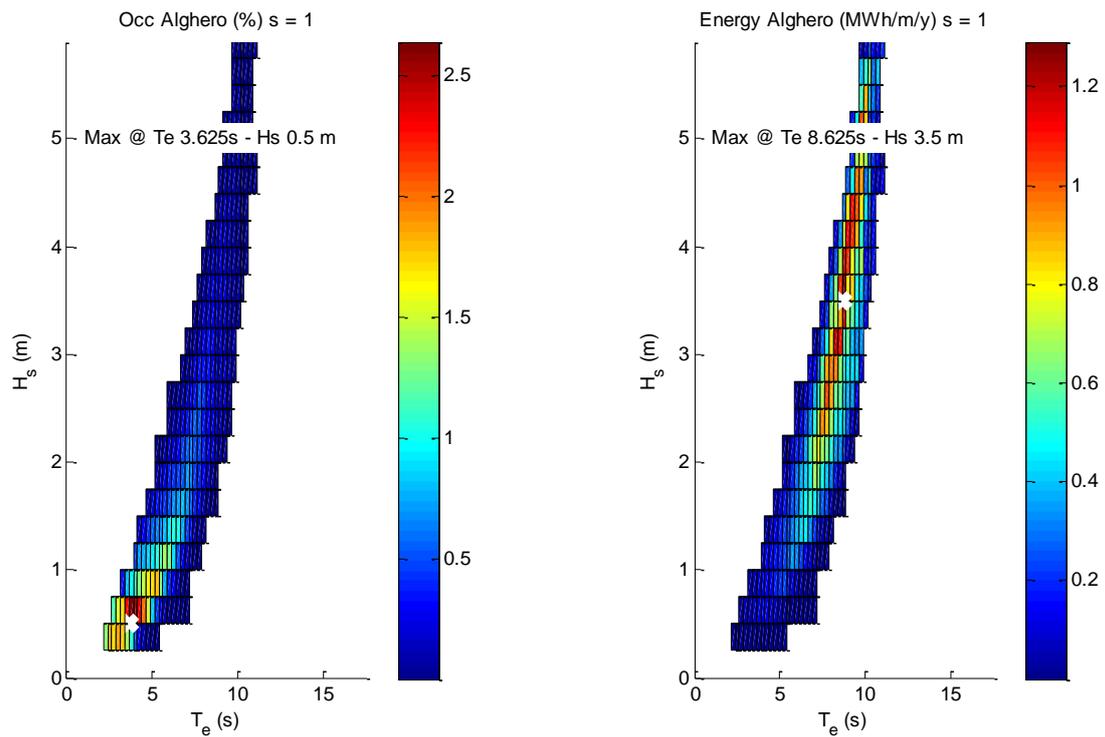
sec	<=1.5	<=3	<=4.5	<=6	<=7.5	<=9	<=10.5	<=12	<=13.5	<=15	<=16.5	<=18	>18	TOT										
>9.5														0										
<=9.5														0										
<=9														0										
<=8.5														0										
<=8														0										
<=7.5								1						1										
<=7								2	1					3										
<=6.5								3	14	5				22										
<=6								4	20	6				30										
<=5.5								2	11	70	5			88										
<=5								3	31	105	2			141										
<=4.5								7	69	544	5			225										
<=4								2	29	148	102	2		343										
<=3.5								7	78	265	124	1		467										
<=3								2	69	225	418	95		809										
<=2.5								24	191	480	366	23		1084										
<=2								73	507	754	223	1		1558										
<=1.5								73	568	1316	585	41	2	2585										
<=1								43	695	1665	1783	274	17	4407										
<=0.5								620	1434	1790	728	117	12	4906										
TOT	0	0	0	1	188	541	846	1758	2607	2501	1977	1491	1223	1107	829	653	440	251	139	80	20	9	1	16669

Figura 5 - Scatter di Alghero (Dati RON, H<sub>s</sub>-T<sub>p</sub>)

sec	<=0.5	<=1	<=1.5	<=2	<=2.5	<=3	<=3.5	<=4	<=4.5	<=5	<=5.5	<=6	<=6.5	<=7	<=7.5	<=8	<=8.5	<=9	<=9.5	<=10	<=10.5	<=11	<=11.5	
>9.5																								
<=9.5																								
<=9																								
<=8.5																								
<=8																								
<=7.5																								1
<=7																								3
<=6.5																1	2	8	6	1	2	2		
<=6																1	4	16	4		1			
<=5.5																9	34	14	7	9	13	2		
<=5															5	34	42	16	15	14	10	4	1	
<=4.5															2	17	62	44	25	27	15	5	2	
<=4															12	62	59	37	51	62	37	18	5	
<=3.5															18	68	96	65	57	88	46	20	9	
<=3											32	77	114	128	128	157	109	45	17	2				
<=2.5								1	30	109	120	176	194	188	173	62	22	9						
<=2								35	136	226	278	290	293	187	71	40	2							
<=1.5								12	139	340	505	482	468	344	225	60	7	1	1	1				
<=1					5	120	356	597	816	970	829	454	183	60	9	5		1		1				
<=0.5				1	183	421	478	1022	1415	860	299	76	34	27	26	20	10	9	5	6	1	6	1	
TOT	0	0	0	1	188	541	846	1758	2607	2501	1977	1491	1223	1107	829	653	440	251	139	80	20	9	1	

Figura 6 - Scatter di Alghero (Dati RON, H<sub>s</sub>-T<sub>m</sub>)

In Figura 7 invece è riportata la scatter di Alghero ottenuta a partire dai dati ENEA, in particolare nella figura di sinistra sono mostrate le occorrenze, mentre nella figura di destra è mostrata l'energia.



**Figura 7 - Scatter di Alghero (dati ENEA)**

Dalla Figura 7 è possibile notare come i parametri sintetici  $H_s$  e  $T_e$  dell'onda più ricorrente siano nettamente differenti rispetto a quelli dell'onda più energetica.

### 5.3 Pantelleria

In Figura 8 è riportata la scatter di Pantelleria ottenuta a partire dai dati dell'ondametro AWAC ed in particolare nella figura di sinistra sono mostrate le occorrenze, mentre nella figura di destra è mostrata l'energia.

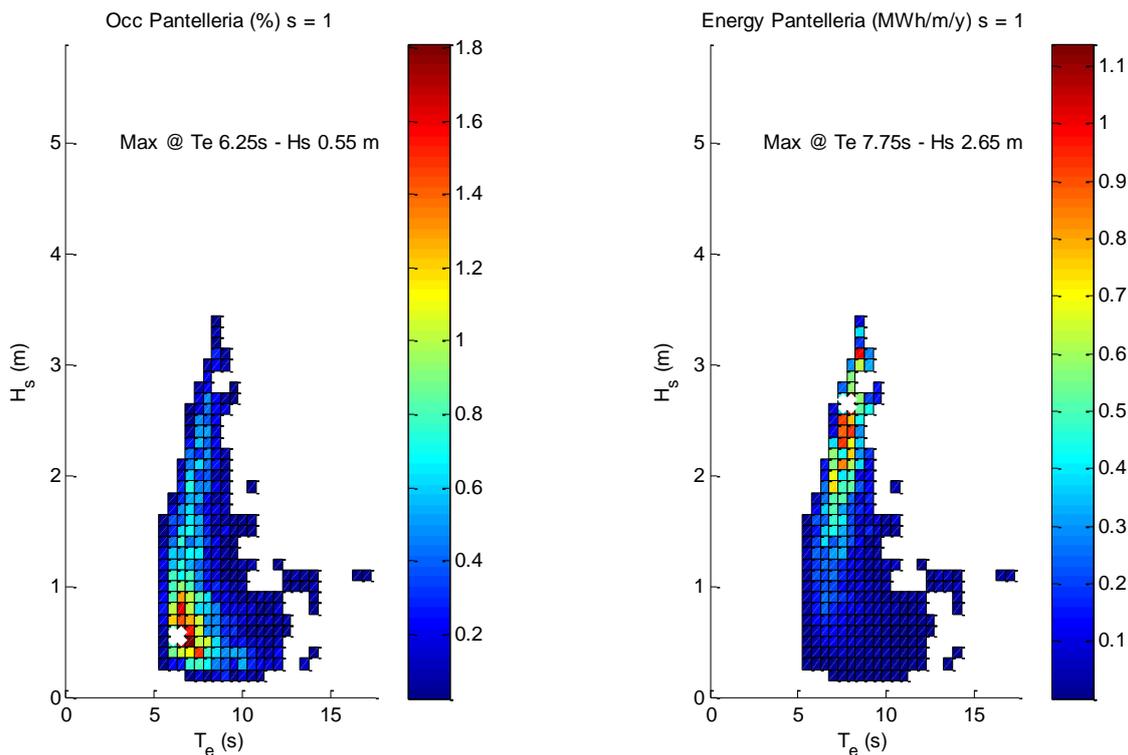


Figura 8 - Scatter di Pantelleria (da AWAC, 2010, file "ST\_Pantelleria.mat")

Anche in questo caso è possibile notare come i parametri sintetici  $H_s$  e  $T_e$  dell'onda più ricorrente siano nettamente differenti rispetto a quelli dell'onda più energetica.

#### 5.4 Caratteristiche della vasca di prova

La vasca di prova considerata per l'esecuzione delle prove sperimentali sul prototipo PEWEC è il bacino n°2 disponibile presso l'Istituto INSEAN sito in Via di Vallerano 139, 00128 Roma.

In Figura 9 è riportata una fotografia dei bacini di prova disponibili presso il suddetto Istituto.



Figura 9 - Bacini rettilinei presso INSEAN (n° 1 a destra, n° 2 a sinistra)

In Tabella 1 si propongono le caratteristiche tecniche del bacino n° 2.

Caratteristiche tecniche bacino n°2 INSEAN		
Lunghezza	220	m
Larghezza	9	m
Profondità	3.5	m
Range lunghezze onda regolare	1 – 10	m
Range periodo onda regolare	0.8 – 2.53	m
Range altezza onda regolare	0.1 – 0.45	m
Range pendenza onda regolare	1 – 9	°

Tabella 1 - Caratteristiche bacino n°2 INSEAN

## 5.5 Specifiche dell'infrastruttura

Di seguito si riportano le caratteristiche dell'infrastruttura INSEAN utilizzata per i test in vasca.

- *Dimensions:* 220m (length), 9m (width), 3.5m (water depth);
- *Maximum carriage speed:* 10m/s (accuracy better than 0.15%);
- Motor driven, manual and automatic control, manned carriage. Electric drive system with 8 drive-wheels, each coupled to a DC main motor via a reduction gear and 2 pairs of horizontal guide wheels (only on one rail). Electric main motors (57kW x 8);
- *Wavemaker type:* one-side flap-type wavemaker, 9 m wide, electro-hydraulically powered with 3 pumps of 38.5 kW total power, controlled by 100 harmonic component electronic programming device (each harmonic can be modulated both in amplitude and frequency);
- *Wave generation capability:* regular waves from 1 to 10m in length with corresponding height of 100 to 450 mm (slope 1°9°); irregular waves according to any desired sea spectrum condition in appropriate scale;
- *Beach type and extent:* 2 crossed layers of square tubular 70x70 mm equally spaced with movable central part for model transit;
- for mooring tests an additional structure, carrying wind generators, can be added on the beach of the carriage and oriented on the horizontal plane; air blowing generation system, of 2 rows with 6 fans each, capable of a continuous variation of speed (from 0 to 20 m/s), direction (0°±20°) and vertical gradient;
- *Model size range:* 1.5 to 8m;
- *Instrumentation:* force balance dynamometers, model propeller transmission dynamometers, 5-holes Pitot tube, 1 to 6 component balance for rudders and ship model tests, fully submerged propeller dynamometer (thrust range= 400N, torque range= 15Nm, speed range= 60 to 3000 rpm, left and right hand rotation, inclined operation up to ± 15° in the vertical plane), 3D optical system and inertial platform for measuring ship model motion in waves.

## 5.6 *Servizi offerti*

- Ship resistance and self propulsion tests in calm water (deep and shallow water);
- Seakeeping and propulsion evaluation in head and following waves;
- Station-keeping of marine structures (floating and submerged) in waves;
- Flow velocimetry and acoustic field measurements;
- Hydrodynamic force and moments measurements on fixed and moving bodies;
- Mooring tests;
- Body-to-body interaction;
- Structural response to hydrodynamic loads.

## 5.7 Scalatura

In Tabella 2 vengono presi a riferimento i punti di massima ricorrenza ed energia di Alghero e Pantelleria e vengono scalati con tre diversi fattori: 8, 10, 12 e 15.

Sito	Alghero						Pantelleria					
	Massima ricorrenza			Massima energia			Massima ricorrenza			Massima energia		
Condizione	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$P_d$ (W/m)	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$P_d$ (W/m)	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$P_d$ (W/m)	$H_s$ (m)	$T_e$ (s)	$P_d$ (W/m)
Scala 1:1	0,5	3,63	445	3,5	8,63	51802	0,55	6,25	926	2,65	7,75	26668
Scala 1:8	0,06	1,28	2,46	0,44	3,05	286,17	0,07	2,21	5,12	0,33	2,74	147,32
Scala 1:10	0,05	1,15	1,41	0,35	2,73	163,81	0,06	1,98	2,93	0,27	2,45	84,33
Scala 1:12	0,04	1,05	0,89	0,29	2,49	103,85	0,05	1,80	1,86	0,22	2,24	53,46
Scala 1:15	0,03	0,94	0,51	0,23	2,23	59,44	0,04	1,61	1,06	0,18	2,00	30,60

**Tabella 2 - Scalatura condizioni ondose dei siti di Alghero e Pantelleria**

Il punto di progetto può essere individuato incrociando i dati delle condizioni ondose dei siti scalati con le specifiche della vasca. Si possono dunque effettuare le seguenti considerazioni:

- *Massima ricorrenza*: sia nel caso di Alghero che in quello di Pantelleria, la scalatura dello stato di mare reale con fattori compresi fra 8 e 15, porta all'ottenimento di power densities massime di 5.16 W/m, valore troppo piccolo per ottenere risultati apprezzabili. Viene dunque scartata la condizione di massima ricorrenza;
- *Massima energia*: di densità di potenza accettabili. Per quanto riguarda il sito di Alghero si può affermare che è replicabile in vasca quando la scala è compresa tra 1:12 e 1:15, infatti per scale più grandi il periodo tipico cade al di fuori del range nominale della vasca.

Si decide quindi di procedere in scala 1:12 in modo da avere dei contenuti di potenza ondosa maggiori.

Dato che in scala 1:12 la condizione di Pantelleria di massima energia ricade maggiormente all'interno del periodo massimo di 2.5 s rispetto a quella di Alghero (2.24 s contro 2.4 s), si decide di prendere a riferimento la condizione ondosa di massima energia di Pantelleria.

Di seguito il periodo energetico e l'altezza media significativa della condizione di massima energia di Pantelleria scalate di un fattore 12.

Caratteristiche onda di progetto in scala 1:12		
$H_s$	0.22	m
$T_e$	2.24	s
$P_d$	53.46	W/m

**Tabella 3 - Caratteristiche onda di progetto, scala 1:12 rispetto alla condizione più energetica del sito di Pantelleria**

Procedendo con il principio di isoenergeticità delle onde, si identifica la condizione ondosa di prova nella seguente tabella.

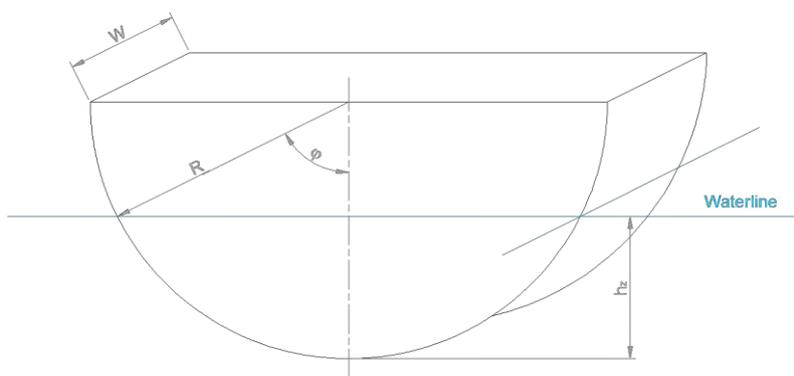
Condizione ondosa regolare	A	
H	0.15	m
T	2.2	s
$P_d$	50	W/m

**Tabella 4 - Condizioni di prova in onda regolare**

## 6 La progettazione dello scafo

### 6.1.1 Geometria

La geometria considerata per lo studio parametrico dello scafo del prototipo 1:12 del Pendulum Wave Energy Converter (PEWEC) corrisponde ad un superficie cilindrica di raggio  $R$  e di larghezza  $W$  come mostrato in Figura 10. È immediato osservare che la lunghezza dello scafo corrisponde a due volte il raggio  $R$  della superficie cilindrica. La massa di questo componente viene indicata con  $m_b$ .



**Figura 10 - Schema semplificato dello scafo e della geometria della porzione sommersa**

La scelta di questo profilo è dettata dalle seguenti ragioni:

- Dal punto di vista idrodinamico la geometria cilindrica è una forma instabile e dunque è particolarmente interessante per l'applicazione in oggetto, dove è necessaria una buona oscillazione dello scafo a fronte di una perturbazione esterna;
- La geometria cilindrica è facilmente realizzabile mediante un processo di calandratura della lamiera piana.

### 6.1.2 Studio parametrico della geometria

Le prestazioni idrodinamiche dello scafo dipendono dalle sue dimensioni (raggio e larghezza), dalla massa, dal tensore di inerzia e dalla posizione del baricentro.

Pertanto, per riuscire a studiare tali prestazioni, è necessario condurre un'analisi parametrica dello scafo. In altre parole, si eseguono una serie di simulazioni al variare dei parametri che caratterizzano lo scafo.

### 6.1.3 Scelta dei parametri

Sulla base delle osservazioni effettuate in precedenza l'analisi parametrica è stata condotta al variare delle dimensioni geometriche dello scafo ( $R$  e  $W$ ) e della sua massa ( $m_b$ ).

I valori considerati sono riportati in Tabella 5 e danno origine a 100 configurazioni possibili di scafi.

Studio parametrico dello scafo		
Raggio, $R$	1 – 1.25 – 1.5 – 1.75 – 2	$m$
Larghezza, $W$	1.5 – 2 – 2.5 – 3	$m$
Massa, $m_b$	1000 – 1500 – 2000 – 2500 – 3000	$kg$

**Tabella 5 - Parametri selezionati per lo studio parametrico dello scafo**

L'analisi idrodinamica di tali configurazioni è stata eseguita con i seguenti obiettivi:

1. ottenere un prototipo il più versatile possibile dal punto di vista della sintonizzazione rispetto alla frequenza dell'onda incidente, si decide di variare il momento d'inerzia del galleggiante variando la posizione delle masse al suo interno
2. mantenere la massa costante anche se il peso del pendolo viene variato
3. Il bilanciamento dell'assetto statico

Lo scafo individuato ha le seguenti caratteristiche:

- Larghezza 2 m
- Lunghezza 3 m
- Altezza 1.5 m
- Massa 3000 kg
- Inerzia 1800 kgm<sup>2</sup>

Si mostra un esempio di sintonizzazione del prototipo al variare della sua inerzia.

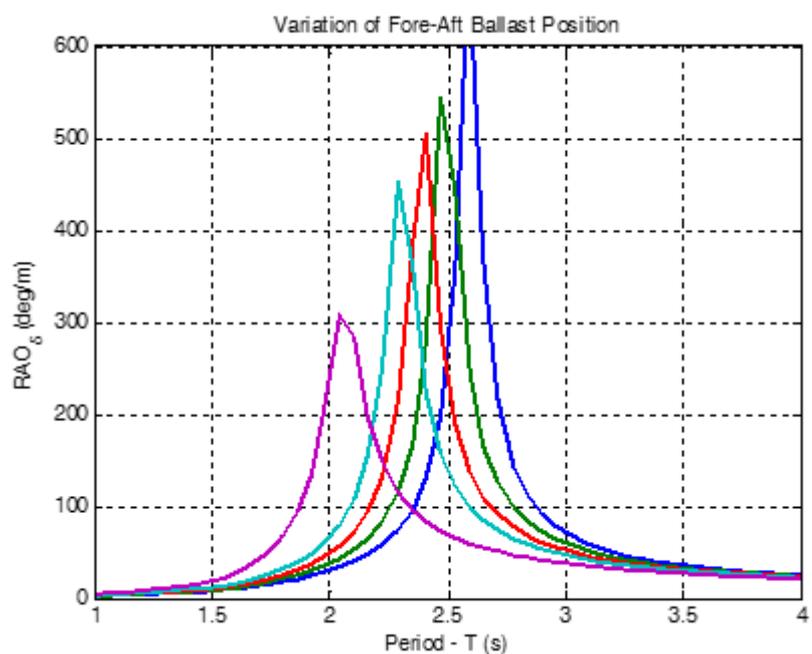


Figura 11 – Variazione della risposta in frequenza al variare dell’inerzia dello scafo (condizione nominale linea azzurra)

## 7 La progettazione del pendolo

### 7.1.1 Pendolo fisico

In Figura 12 è rappresentato un esempio generico di pendolo fisico, composto da una massa uniformemente distribuita e incernierata in  $O$ . Il baricentro della massa è individuato dal punto  $G$ , il quale dista  $l$  dal punto  $O$ . La distanza  $l$  è misurata sulla congiungente dei punti  $O$  e  $G$ .

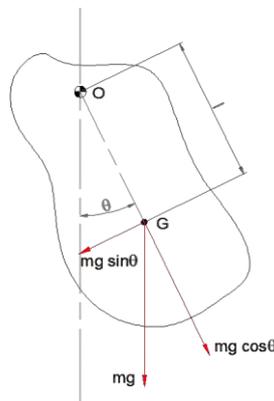


Figura 12 - Pendolo fisico

L'equazione di equilibrio alla rotazione del pendolo rappresentato in Figura 12, nell'ipotesi di trascurare gli attriti nella cerniera e di assumere angoli di oscillazione sufficientemente piccoli, risulta essere:

$$I_0 \ddot{\vartheta} + m_p g l \vartheta = 0 \quad (26)$$

Dove:

- $I_0$  ( $kgm^2$ ): è il momento di inerzia della massa oscillante rispetto alla cerniera;
- $m_p$  ( $kg$ ): massa del pendolo;
- $l$  ( $m$ ): distanza tra la cerniera del pendolo e il suo baricentro.

Osservando l'equazione (26) si può osservare come la rigidità del sistema sia rappresentata dal termine gravitazionale  $m_p g l$ .

L'equazione (26) può essere riscritta anche nel seguente modo:

$$\ddot{\vartheta} + \frac{m_p g d}{I_0} \vartheta = 0 \quad (27)$$

Pertanto il periodo di risonanza del pendolo fisico è esprimibile come:

$$T_n = 2\pi \sqrt{\frac{I_0}{m_p g l}} \quad (28)$$

Volendo introdurre anche l'effetto del controllo  $c$ - $k$ , l'equazione (27) si modifica nel seguente modo:

$$\ddot{\vartheta} + c\dot{\vartheta} + \left(k + \frac{m_p g d}{I_0}\right) \vartheta = 0 \quad (29)$$

7.1.2 Progettazione della massa oscillante

A partire dai dati numerici analizzati in precedenza, sono emerse le seguenti considerazioni:

- La massa del pendolo deve poter essere regolata entro valori compresi tra 200 e 500 kg;
- La lunghezza del pendolo deve poter essere regolata in modo da poter investigare configurazioni risonanti a periodi diversi da quello nominale fissato a 2.2 s;
- Sulla base degli studi descritti in precedenza si vuole avere la possibilità di investigare geometrie diverse da quelle a disco come ad esempio quella a semi-disco.

Occorre dunque realizzare una struttura idonea a rispettare i requisiti soprariportati. In Figura 13 si riporta il complessivo del pendolo.

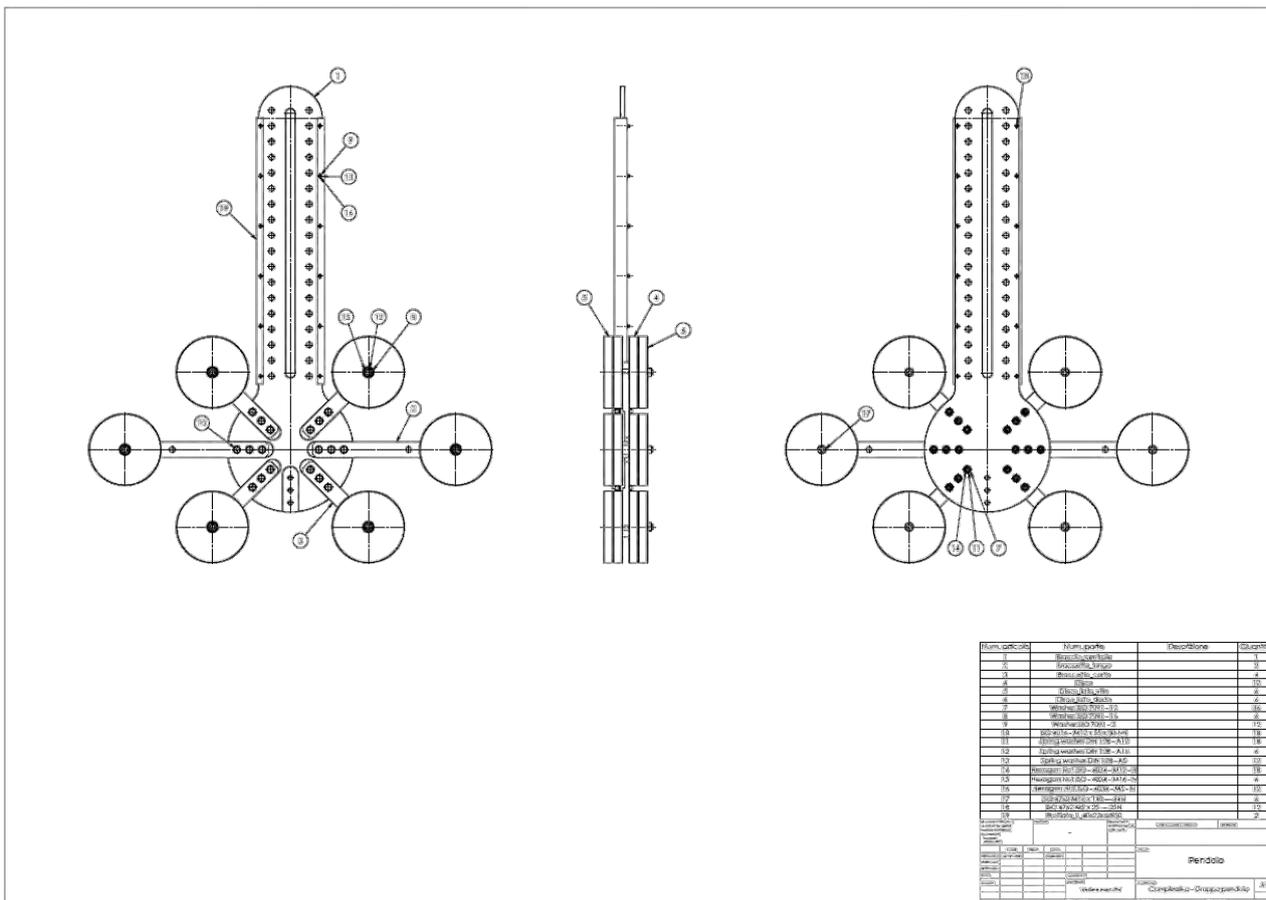


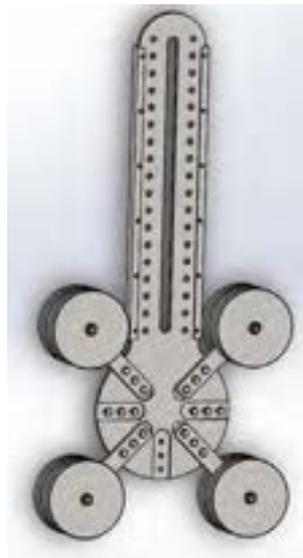
Figura 13 - Complessivo pendolo

Il pendolo è costituito da un'anima centrale in acciaio dotata di una serie di fori che consentono di vincolare il pendolo, sulla flangia del gruppo PTO, in differenti posizioni; in questo modo è possibile modificare la lunghezza del pendolo.

Sull'anima centrale del pendolo sono fissate sei staffe e su ognuna di esse è possibile vincolare quattro dischi in acciaio con massa pari 10 kg. Nella configurazione a pieno carico il pendolo presenta una massa pari a 282 kg e considerando che nel sistema sono presenti due pendoli in parallelo, è possibile realizzare un pendolo da 564 kg.

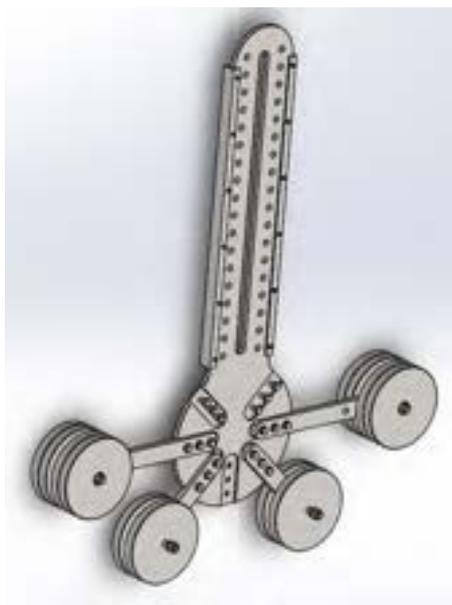
Inoltre è facile vedere che rimuovendo i dischi e i braccetti è possibile approssimare differenti configurazioni geometriche del pendolo, quali:

- Configurazione a disco



**Figura 14 - Configurazione a disco**

- Configurazione a semi-disco



**Figura 15 - Configurazione a semi-disco**

- Configurazione ovale

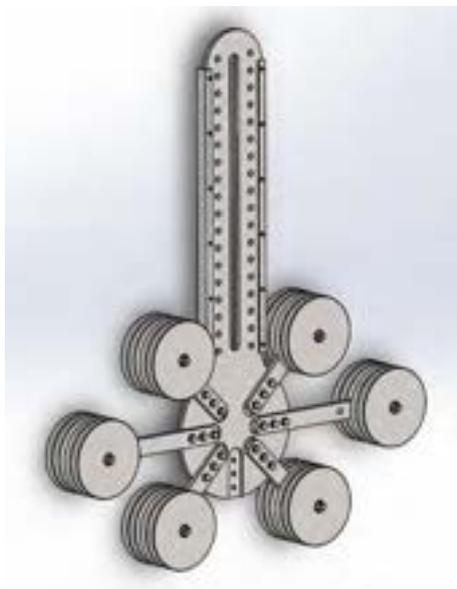


Figura 16 - Configurazione ovale

### 7.1.3 Analisi configurazione ovale

Si osserva che la configurazione ovale è stata determinata in fase di progettazione, infatti è stato notato che tale geometria consente di ottimizzare il momento di inerzia baricentrico del pendolo e dunque di limitare l'ingombro complessivo della massa oscillante.

In particolare tale geometria è stata ottimizzata in modo tale da ottenere un pendolo da 200 kg risonante a 2.2 s quando il pendolo è a massima estensione; in altre parole considerando i due pendoli in parallelo si ottiene un pendolo equivalente di massa 400 kg e con periodo massimo di risonanza pari a 2.2 s (si veda Figura 17).

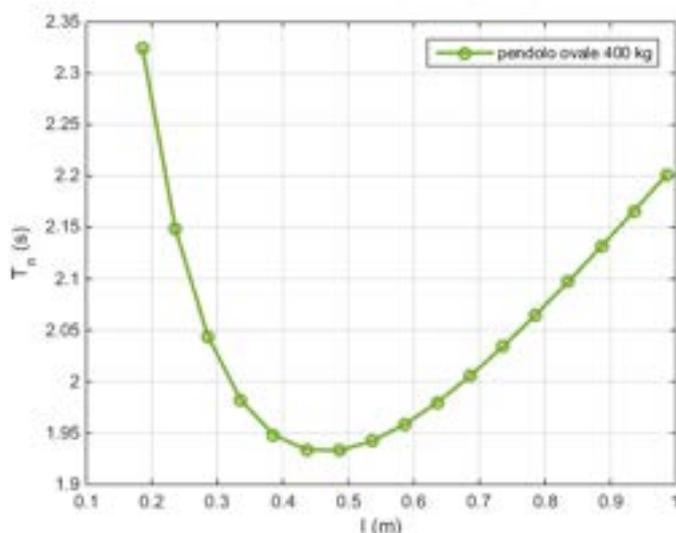


Figura 17 - Caratteristica periodo di risonanza del pendolo al variare della sua lunghezza

#### 7.1.4 Verifica strutturale

Il pendolo è stato verificato dal punto di vista strutturale mediante un codice FEM. Lo scopo di questa analisi è quello di verificare la resistenza dei vari elementi che lo costituiscono, considerando le condizioni più sfavorevoli di in termini di massa, velocità angolare e accelerazione angolare del pendolo.

In Figura 18 si riporta il risultato della simulazione agli elementi finiti.

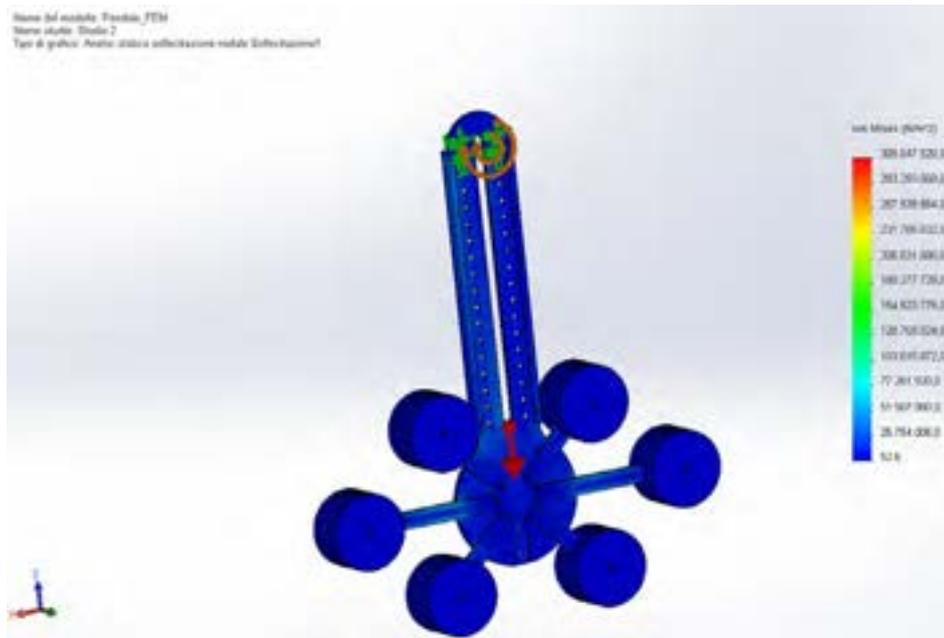


Figura 18 - Verifica strutturale FEM del pendolo

In Figura 19 si riporta invece la verifica a deformazione della struttura del pendolo.

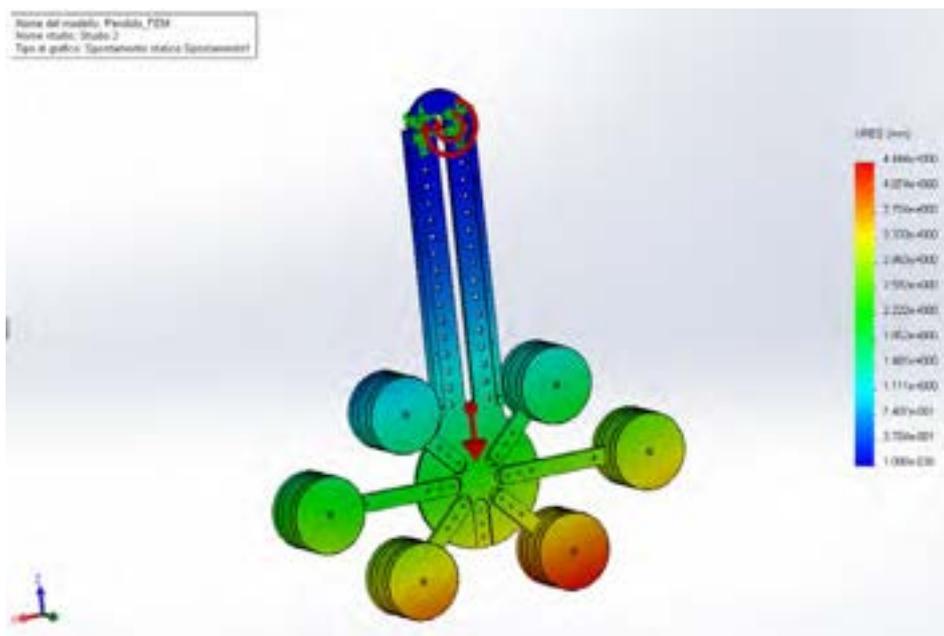


Figura 19 - Verifica a deformazione del pendolo

### 7.1.5 Analisi modale

In ultimo è stata effettuata l'analisi modale del pendolo con lo scopo di verificare se le frequenze di oscillazione proprie della struttura sono sufficientemente distanti dalla frequenza di lavoro del pendolo (circa 0.45 Hz, 2.2 s di periodo). In particolare è importante verificare dove si colloca la prima frequenza naturale.

Il caso più sfavorevole si verifica quando la lunghezza del pendolo e la sua massa sono le massime ammissibili dal campo di regolazione. Alleggerendo il pendolo, a parità di lunghezza o accorciando il pendolo e mantenendo costante la massa, si ha un incremento della rigidità del pendolo e dunque si ha un incremento della frequenza di risonanza trasversale.

In Figura 20 viene riportato il risultato numerico relativo alla prima frequenza di risonanza del pendolo che è pari a 2.63 Hz, valore sufficientemente distante dalla frequenza di lavoro del pendolo e dell'intero sistema. Si osserva che questo risultato è stato raggiunto attraverso l'irrigidimento dell'anima del pendolo mediante due profilati ad L in acciaio.

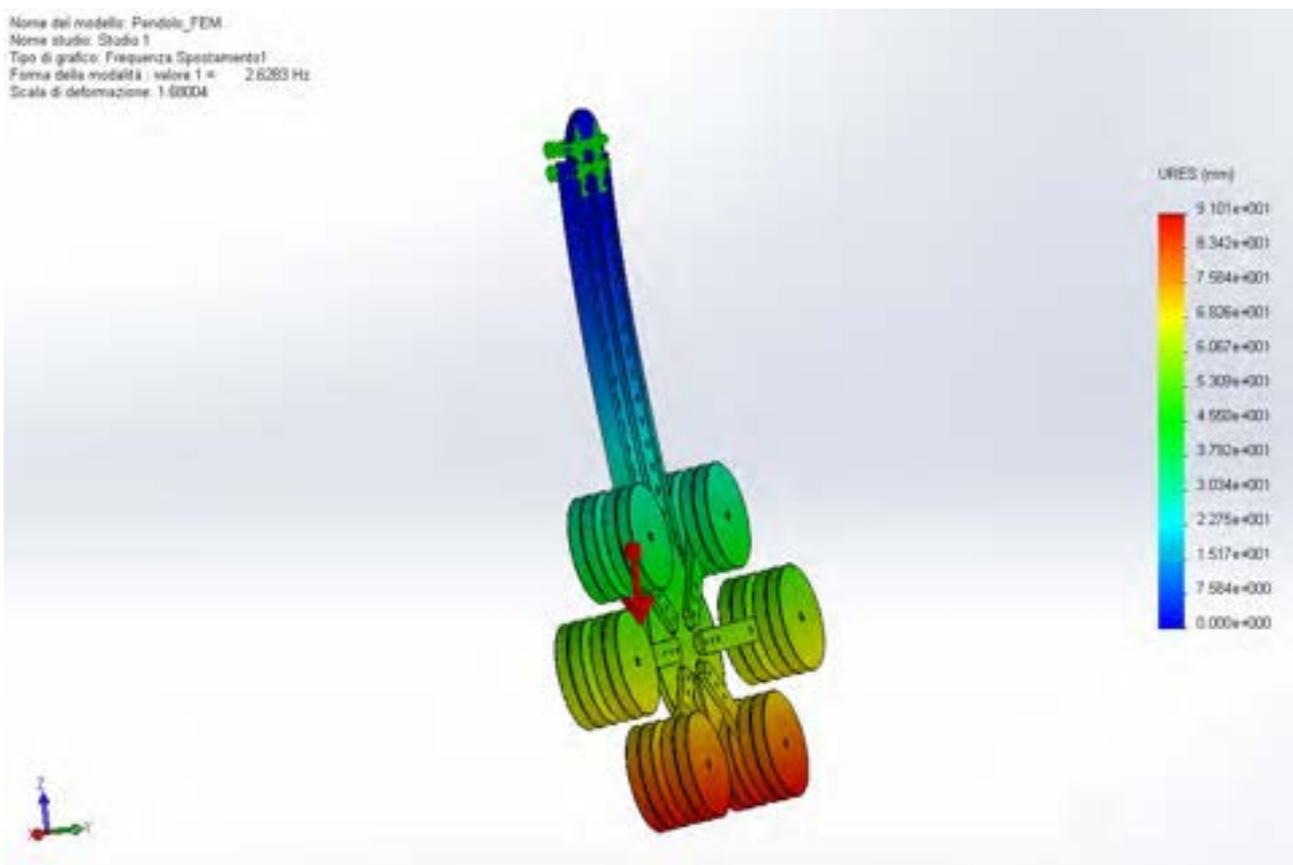


Figura 20 - Risultato numerico relativo alla prima frequenza naturale identificata con l'analisi modale