



Ricerca di Sistema elettrico

Metodologia progettuale di un sistema di conversione inerziale di tipo passivo

G. Mattiazzo, E. Giorcelli, G. Bracco, E. Giovannini, A. Fontanella,
G. Sannino

METODOLOGIA PROGETTUALE DI UN SISTEMA DI CONVERSIONE INERZIALE DI TIPO PASSIVO

G. Mattiazzo (Politecnico di Torino), E. Giorcelli (Politecnico di Torino), G. Bracco (Politecnico di Torino), E. Giovannini (ENEA-UTRIN), A. Fontanella (ENEA-UTRIN), G. Sannino (ENEA-UTMEA)

Settembre 2014

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2013

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: d: Sviluppo di un sistema oscillante passivo per il recupero di energia dal moto ondoso

Responsabile del Progetto: G. Sannino, ENEA

Indice

SOMMARIO	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI CALCOLO	5
2.1 DINAMICA DEL SISTEMA OSCILLANTE	7
2.2 SISTEMA DI CONVERSIONE PTO	9
2.3 IDRODINAMICA DELLO SCAFO	9
3 SIMBOLI UTILIZZATI NEL MODELLO DI CALCOLO	10
4 CRITERI DI PROGETTAZIONE DEL PROTOTIPO IN SCALA	11
5 CONCLUSIONI	13
6 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	13

Elenco delle figure

Figura 1- Gradi di libertà del galleggiante	6
Figura 2- Schematizzazione geometrica	7
Figura 3- Geometria dello scafo	12
Figura 4- Geometria della massa oscillante	12

Elenco delle tabelle

Tabella 1- Spostamenti del galleggiante	6
---	---

Sommario

Il Piano Annuale di Attuazione 2013 (PAR 2013) dell'Accordo di Programma tra Ministero per lo Sviluppo Economico e l'ENEA per la Ricerca sul Sistema Elettrico, relativamente al progetto B.1.5 "Studi e valutazioni sulla produzione di energia elettrica dalle correnti marine e dal moto ondoso" e all' Obiettivo d) " Sviluppo di un sistema oscillante passivo per il recupero di energia dal moto ondoso" prevede l'emissione dei seguenti rapporti:

1. Report di sintesi sulla metodologia progettuale del sistema di conversione di tipo passivo.
2. Progettazione e costruzione del sistema meccanico di conversione in scala 1:45
3. Report di sintesi delle attività contenente: disegni costruttivi del dispositivo, nota sulle verifiche e prove preliminari, descrizione delle prove sperimentali, e risultati ottenuti.
4. Report di sintesi sull'installazione e valutazione delle prestazioni del sistema di conversione "attivo"

Questo rapporto è il n. 1 e descrive la metodologia seguita per la progettazione del prototipo in scala del sistema di conversione. La metodologia si basa sul modello matematico sviluppato dal Politecnico di Torino e su una serie di criteri tecnici e operativi per la progettazione di un prototipo in scala 1:45 idoneo per la sperimentazione presso i laboratori del Politecnico di Torino.

L'attività è stata svolta congiuntamente dall'ENEA e dal Politecnico di Torino, ed in particolare il Politecnico ha curato lo sviluppo del modello matematico e l'ENEA ha curato l'elaborazione delle scelte progettuali ed operative per la costruzione del prototipo

Le indicazioni ottenute hanno consentito di procedere alla progettazione meccanica del prototipo e alla sua fabbricazione, come descritto nel rapporto n.2 .

1 Introduzione

I dispositivi di tipo inerziale rappresentano una delle tecnologie più promettenti per la produzione di energia elettrica dal moto ondoso. I principali vantaggi sono legati all'assenza di parti in movimento a contatto con l'acqua di mare e all'assenza di strutture fisse da installare nell'ambiente marino.

Questi dispositivi sono costituiti essenzialmente da uno scafo ormeggiato in mare aperto e contenente al suo interno una massa libera di oscillare e collegata ad un generatore elettrico. Per effetto del moto ondoso che lo investe, lo scafo oscilla rispetto al suo asse trasversale e lo spostamento periodico della massa mobile al suo interno aziona il generatore elettrico, che è collegato alla rete mediante un cavo sottomarino.

I dispositivi inerziali possono essere di tipo attivo o passivo. Nel primo caso un sistema giroscopico a velocità variabile accentua l'effetto inerziale e consente di adeguare il funzionamento del sistema alle caratteristiche delle onde incidenti; nel secondo caso l'effetto di inerzia è dato da una massa oscillante e la regolazione è affidata al generatore elettrico e ad eventuali sistemi per modificare l'assetto dello scafo.

I sistemi attivi, pur avendo fornito buoni risultati sperimentali ed essendo risultati promettente dal punto di vista applicativo, presentano alcune criticità che potrebbero limitarne il campo di applicazione: in particolare il consumo di energia per mantenere in rotazione il giroscopio risulta significativo e nei casi di potenziale marino medio-basso, frequente nei mari italiani, la resa energetica netta potrebbe risultare non soddisfacente.

I sistemi inerziali passivi si basano su un galleggiante ormeggiato di prua che, investito dal moto ondoso, oscilla rispetto al suo asse trasversale e a sua volta produce l'oscillazione di una massa sospesa al suo interno, tipo pendolo; operando in condizioni di risonanza l'oscillazione della massa risulta amplificata rispetto alle onde incidenti e il moto può essere trasmesso ad un generatore elettrico per la produzione di energia. La difficoltà consiste nel dimensionare il dispositivo in modo tale da poter operare in condizioni prossime a quelle di risonanza per un periodo sufficientemente ampio a fronte della grande variabilità e irregolarità del moto ondoso.

Lo sviluppo di questa tecnologia si basa su due elementi fondamentali: la modellizzazione matematica e la sperimentazione in scala ridotta.

La modellazione matematica del sistema inerziale passivo ha lo scopo di ricercare i parametri progettuali e di regolazione per massimizzarne la produttività tenendo conto delle specificità dell'applicazione: alte coppie, basse velocità angolari e moto alternato e soprattutto irregolarità delle forzanti.

Di seguito vengono descritti il modello di calcolo sviluppato e i criteri di progettazione adottati per il prototipo in scala 1:45.

2 Descrizione del modello di calcolo

Per lo studio fisico-matematico dei corpi galleggianti sottoposti all'azione del moto ondoso ci sono quattro principali tipi di approcci:

- modellizzazione analitica
- analogia con le navi

- analisi modale
- codici computazionali

Per la descrizione dei quattro approcci si rinvia al riferimento [1] della bibliografia.

In generale, un corpo solido parzialmente immerso in acqua può muoversi secondo sei gradi di libertà: può traslare lungo 3 assi (longitudinale, trasversale e verticale) e può ruotare intorno agli stessi tre assi.

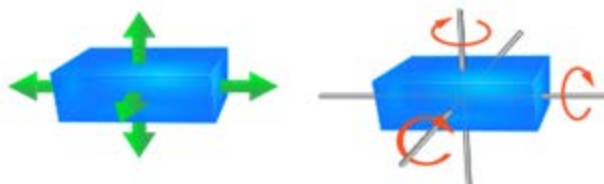


Figura 1- Gradi di libertà del galleggiante

Ciascuno di questi spostamenti ha un nome particolare di derivazione nautica, come schematizzato in Tabella 1.

Tabella 1- Spostamenti del galleggiante

	LONGITUDINALE	TRASVERSALE	VERTICALE
TRASLAZIONE	AVANZAMENTO (SURGE)	DERIVA (SWAY)	SUSSULTO (HEAVE)
ROTAZIONE	ROLLIO (ROLL)	BECCEGGIO (PITCH)	IMBARDATA (YAW)

In assenza di onde, sul galleggiante agisce la forza peso, proporzionale alla sua massa, bilanciata dalla spinta idrostatica, che è proporzionale al volume di liquido spostato.

In condizioni dinamiche, cioè in presenza di moto ondoso, sul galleggiante agisce anche la forza di eccitazione dovuta alla pressione esercitata dal liquido sulla superficie bagnata del corpo.

L'equilibrio dinamico del galleggiante può essere descritto dalla legge di Newton, che uguaglia la variazione istantanea della sua quantità di moto alla risultante delle forze esterne che agiscono.

Tra queste forze occorre tenere conto, oltre che della forza peso, della spinta idrostatica e della spinta delle onde, anche delle forze di attrito tra lo scafo e l'acqua, della massa d'acqua che segue il movimento dello scafo (massa aggiunta) e dell'azione delle onde prodotte dal movimento dello stesso scafo.

Inoltre l'entità di queste forze varia in modo non proporzionale rispetto alle onde.

Si comprende quindi che un approccio completamente analitico può essere utilizzato solo per geometrie semplici, come il cilindro o la sfera. In generale occorre integrare l'approccio analitico con procedimenti numerici e occorre validare il modello con prove sperimentali.

La geometria del sistema costituito dallo scafo e dalla massa oscillante al suo interno è schematizzata in Figura 2.

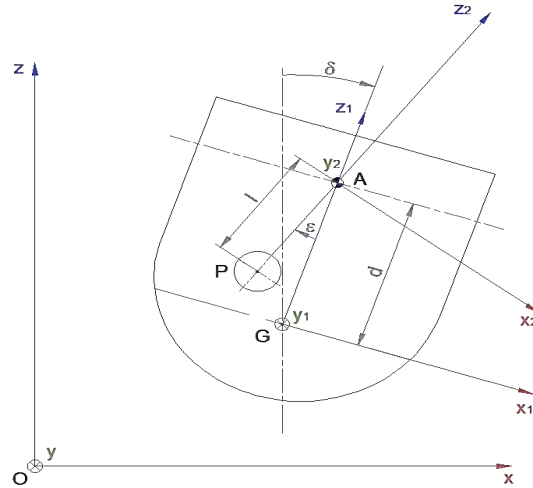


Figura 2- Schematizzazione geometrica

La distanza tra il baricentro dello scafo e la cerniera del pendolo viene indicata con d , mentre la lunghezza dell'asta del pendolo viene indicata con l e la massa del pendolo, indicata con m_p , è posta nel punto P . O è l'origine del sistema inerziale di riferimento, A è la cerniera di rotazione del pendolo e P è il baricentro della massa oscillante.

Si scrivono quindi le posizioni del punto P e del baricentro dello scafo G rispetto all'origine del sistema di riferimento fisso O .

$$\overrightarrow{OP} = [x_G + d \cdot \sin \delta - l \cdot \sin(\delta + \varepsilon) \quad 0 \quad z_G + d \cdot \cos \delta - l \cdot \cos(\delta + \varepsilon)]^T \quad (1)$$

$$\overrightarrow{OG} = [x_G \quad 0 \quad z_G]^T \quad (2)$$

Le velocità dei punti P e G sono ottenute tramite derivazione rispetto al tempo della lunghezza OP .

$$\overrightarrow{\dot{O}P} = [\dot{x}_G + d \dot{\delta} \cos \delta - l(\dot{\delta} + \dot{\varepsilon}) \cos(\delta + \varepsilon) \quad 0 \quad \dot{z}_G - d \dot{\delta} \sin \delta - l(\dot{\delta} + \dot{\varepsilon}) \sin(\delta + \varepsilon)]^T \quad (3)$$

$$\overrightarrow{\dot{O}G} = [\dot{x}_G \quad 0 \quad \dot{z}_G]^T \quad (4)$$

2.1 Dinamica del sistema oscillante

Per ricavare le equazioni del moto del sistema oscillante si procede con approccio lagrangiano. L'equazione di Eulero-Lagrange è riportata di seguito.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = 0 \quad (5)$$

Dove T è l'energia cinetica del sistema, V è l'energia potenziale e q è la coordinata lagrangiana di riferimento. Le coordinate lagrangiane per il sistema oscillante sono le seguenti.

$$\begin{bmatrix} x_G \\ z_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} \quad (6)$$

L'espressione dell'energia cinetica del sistema oscillante pendolo T_p e della sua energia potenziale V_p sono riportate di seguito.

$$T_p = \frac{1}{2} I_y (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 + \frac{1}{2} m_p \left| \overrightarrow{OP} \right|^2 \quad (7)$$

$$V_p = m_p g (\overrightarrow{OP})_z = m_p g (z_G + d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)) \quad (8)$$

Si procede quindi a scrivere l'equazione del moto libero del sistema oscillante.

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{z}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_g \quad (9)$$

Dove $\mathbf{M}$ è la matrice di massa del sistema, $\mathbf{F}_c$ è il vettore delle azioni di Coriolis e $\mathbf{F}_g$ è il vettore delle azioni di gravità. $\mathbf{M}$, $\mathbf{F}_c$ e $\mathbf{F}_g$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_p + m_b & 0 & m_p(d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)) & -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) \\ 0 & m_p + m_b & -m_p(d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)) & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) \\ m_p(d \cos \delta - l \cos(\delta + \varepsilon)) & -m_p(d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)) & I_y + I_b + m_p(d^2 + l^2) - 2 m d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon \\ -m_p l \cos(\delta + \varepsilon) & m_p l \sin(\delta + \varepsilon) & I_y + m_p l^2 - m_p d l \cos \varepsilon & I_y + m_p l^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{F}_c = \begin{bmatrix} -m_p \left(l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \sin(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \sin \delta \right) \\ -m_p \left(l (\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 \cos(\delta + \varepsilon) - d \dot{\delta}^2 \cos \delta \right) \\ m_p d l \sin \varepsilon \left((\dot{\delta} + \dot{\varepsilon})^2 - \dot{\delta}^2 \right) \\ m_p d l \dot{\delta}^2 \sin \varepsilon \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$\mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} 0 \\ -(m_p + m_b)g \\ m_p g (d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)) \\ -m_p g l \sin(\delta + \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (12)$$

Considerando il sistema in equilibrio nella posizione statica di galleggiamento, il termine lungo la coordinata z si annulla.

$$\mathbf{F}_g = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ m_p g (d \sin \delta - l \sin(\delta + \varepsilon)) \\ -m_p g l \sin(\delta + \varepsilon) \end{bmatrix} \quad (13)$$

2.2 Sistema di conversione PTO

Si desidera ora inserire l'effetto del PTO, il sistema di conversione dell'energia. Si ipotizza che il PTO si comporti come un sistema lineare molla + smorzatore e che quindi la coppia da esso esercitata sul sistema oscillante nella cerniera sul grado ε sia proporzionale alla posizione del pendolo ε con un coefficiente di rigidità k e alla sua velocità con un coefficiente di smorzamento c .

L'equazione del moto risulta quindi:

$$\mathbf{M} \begin{bmatrix} \ddot{x}_G \\ \ddot{y}_G \\ \ddot{\delta} \\ \ddot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{D} \begin{bmatrix} \dot{x}_G \\ \dot{y}_G \\ \dot{\delta} \\ \dot{\varepsilon} \end{bmatrix} + \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \\ \delta \\ \varepsilon \end{bmatrix} = \mathbf{F}_c + \mathbf{F}_g \quad (14)$$

Dove nelle matrici $\mathbf{D}$ e $\mathbf{K}$ sono inseriti i parametri c e k della legge di regolazione del PTO.

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k \end{bmatrix} \quad (16)$$

2.3 Idrodinamica dello scafo

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

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

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.

3 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
δ	angolo di inclinazione dello scafo rispetto alla verticale
ε	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
ω	frequenza del moto ondoso
$\{x\}$	vettore degli spostamenti

4 Criteri di progettazione del prototipo in scala

L'aspetto fondamentale per la progettazione del prototipo è la considerazione che, in base al rapporto di scala adottato, pari a 1:45 (riferito all'altezza significativa dell'onda incidente) e ai rapporti di scalatura, che derivano dalla similitudine di Froude, la potenza attesa al generatore è dell'ordine di alcuni watt.

Pertanto le dissipazioni per attrito, disallineamenti, giochi eccessivi, deformazione o corrosione dei materiali, imprecisione nelle dimensioni o nei montaggi ecc. possono facilmente mascherare la potenza generata e rendere le prove non significative.

Al fine di contenere il più possibile tali effetti dissipativi è necessario adottare i seguenti criteri di progettazione:

- Materiali idonei al contatto prolungato con l'acqua
- Tolleranze di lavorazione
- Lunghezza minima dell'albero di potenza
- Numero minimo di cuscinetti
- Elementi di guida per l'assemblaggio delle parti mobili

Il secondo aspetto da curare discende dalla natura di prototipo sperimentale e quindi dalla possibilità di modificare agevolmente le caratteristiche funzionali e geometriche con semplici operazioni e di prevedere spazi adeguati per ospitare la strumentazione di bordo, il passaggio cavi e le zavorre aggiuntive per correggere l'assetto idrostatico.

Altro aspetto rilevante è la possibilità di utilizzare il prototipo per successive campagne di sperimentazione, con diversi assetti dello scafo, dispositivi aggiuntivi e diversa strumentazione di bordo. In particolare potrà essere utile sperimentare dispositivi aggiuntivi per rettificare il verso di rotazione del generatore o per modificare da remoto o in automatico i parametri di funzionamento (massa oscillante, lunghezza braccio, posizione cerniera) o l'assetto dello scafo. A tal fine i componenti interni del prototipo devono essere montati su telai facilmente modificabili, con adeguati spazi per alloggiare componenti aggiuntivi.

La **Error! Reference source not found.** riporta la geometria di massima adottata per lo scafo e la Figura 4 rappresenta la geometria del sistema a massa oscillante con relativo telaio.

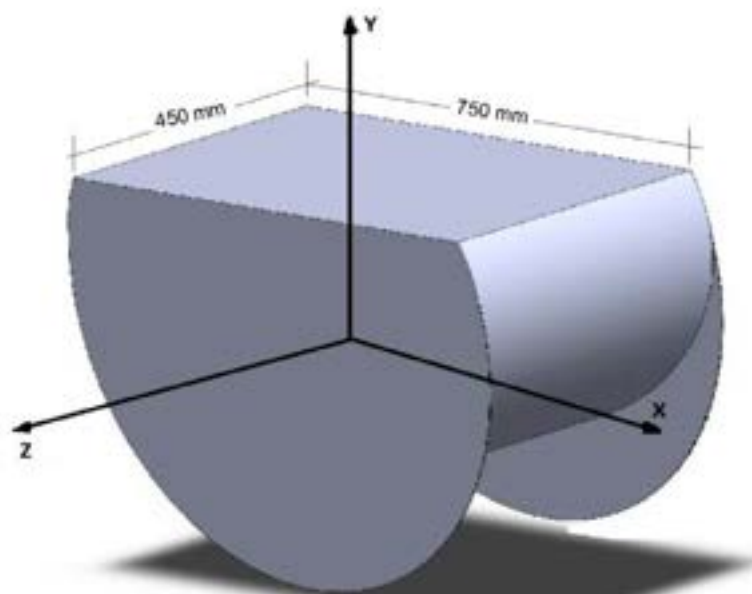


Figura 3- Geometria dello scafo

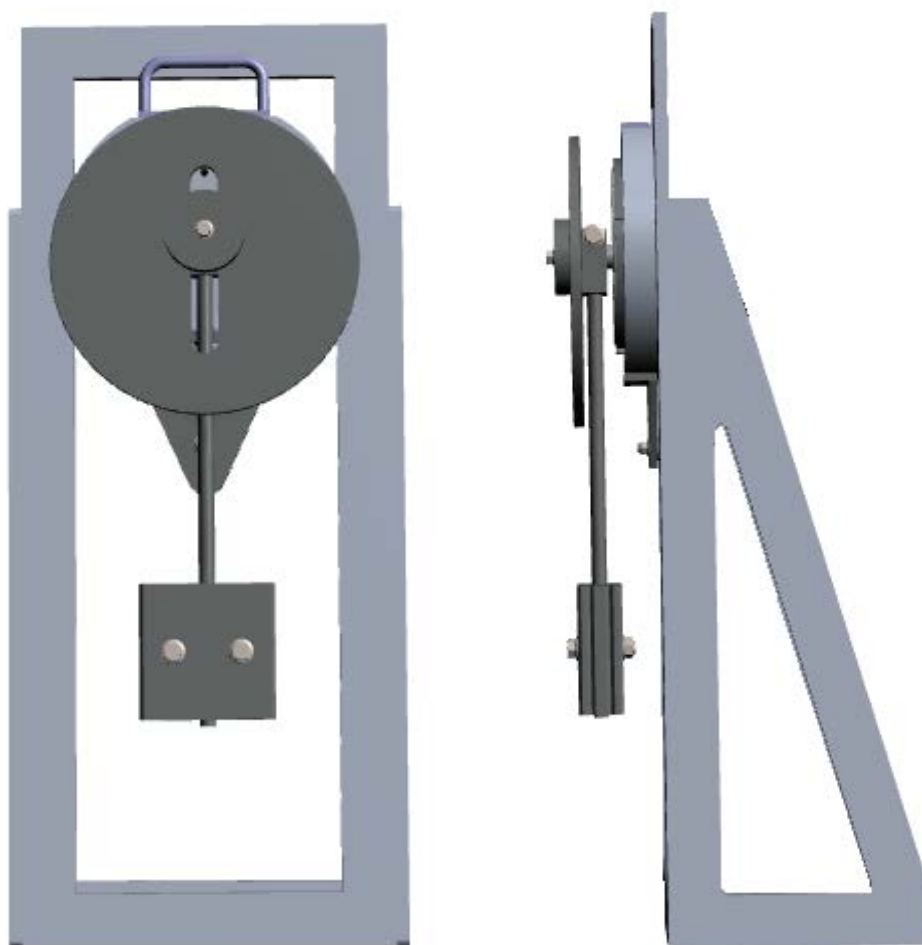


Figura 4- Geometria della massa oscillante

5 Conclusioni

Sulla base dei risultati ottenuti dal modello di calcolo e dei criteri illustrati, si è proceduto alla progettazione meccanica del prototipo sperimentale in scala 1:45 da utilizzare per le prove sperimentali condotte presso i laboratori del Politecnico di Torino, come descritto nel rapporto n. 2.

Le prove sperimentali, descritte nel rapporto n. 3, hanno consentito di validare il modello di calcolo, pertanto l'uso congiunto del modello di calcolo e delle prove sperimentali consentono di proseguire gli sviluppi di questa tecnologia in vista della sua utilizzazione commerciale per la produzione di energia elettrica.

6 Riferimenti bibliografici

[1] Giovanni Rinaldi, *Approcci fisico-matematici per lo sviluppo di dispositivi inerziali per la produzione di energia dal moto ondoso*, Rapporto tecnico ENEA RTI -UTRINN-2014-11

[2] Simone Drocco, *Analisi dinamica di un sistema per la produzione di energia da moto ondoso con architettura a pendolo*, Tesi di Laurea Politecnico di Torino

[3] Giovanni Bracco et al., *A Pendulum based Wave Energy System*, atti del convegno "Energia dal mare – Le nuove tecnologie per i mari italiani", ENEA 1 e 2 luglio 2014

http://www.enea.it/it/enea_informa/events/energia-dal-mare/energia-dal-mare2

[4] Stefano Roveda, *EXPERIMENTAL ANALYSIS OF A PENDULUM BASED INERTIAL SEA WAVES CONVERTER* Bachelor Thesis, Politecnico di Torino, 2014.

[5] Nicola Pozzi "Modeling and experimental test of a Wave Energy Converter", Politecnico di Torino, 2014.