

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale
in INGEGNERIA ELETTRICA

Tesi di Laurea Magistrale:

PROGETTAZIONE E SIMULAZIONE DI ENERGY
HARVESTER PER CUSCINETTI VOLVENTI



Relatori:

Prof. Maurizio Repetto
Prof. Elvio Bonisoli

Candidato:

Gianluca Dattolo

A.A. 2017/2018

Sommario

Il lavoro presentato si propone di ideare, modellare e progettare un sistema di recupero energetico di tipo elettromagnetico in grado di generare energia dalla rotazione di una flangia meccanica. Oggetto della prima parte dell'analisi é capire quali sono i prerequisiti che deve avere il generatore per svolgere al meglio la sua funzione nell'applicazione specifica a cui è destinato. In seguito all'analisi delle caratteristiche costruttive viene studiata la modellizzazione dell' energy harvester attraverso i modelli elettrico e meccanico. Si analizzano in seguito i dati di simulazione dei modelli in modo da avere un quadro delle capacità reali dell'energy harvester progettato.

Indice

1	Energy Harvester	1
1.1	Introduzione	1
1.2	Energy Harvesting e fonti per il raccoglimento dell'energia . .	2
1.3	Confronto fra motori a flusso assiale e motori a flusso radiale .	4
1.4	Tipologie costruttive per macchine a flusso assiale	6
1.5	Energy Harvester per il monitoraggio di un cuscinetto in una macchina agricola	7
2	Modello elettrico	9
2.1	Vincoli geometrici e modellizzazione del energy harvester . . .	9
2.1.1	Dimensionamento statore	11
2.1.2	Dimensionamento rotore	13
2.2	Flusso massimo concatenato e tensione generata	15
2.3	Corrente indotta negli avvolgimenti e potenza recuperata . . .	18
2.4	Riepilogo dati del energy harvester per flangia rotante	19
3	Modello meccanico	20
3.1	Equazioni meccaniche	20
3.2	Introduzione a Simulink e logica dei blocchi	25
3.3	Modello del energy harvester per cuscinetto volvente	28
3.3.1	Blocco Input	28
3.3.2	Blocco Pendulum	35
3.3.3	Blocco CoilMagnet	38
4	Progettazione pendolo	46
4.1	Analisi della geometria del pendolo	46
4.2	Progettazione pendolo nelle varie configurazioni	62
5	Analisi dei risultati del modello dell'energy harvester per cuscinetto volvente	77
6	Conclusioni e fase prototipale futura	85

Elenco delle figure

1.1	Possibili strutture per la realizzazione di macchine elettriche rotanti: (a) struttura radiale (b) struttura assiale	4
1.2	Assolcatore agricolo	8
1.3	Assolcatore agricolo	8
2.1	Vista frontale e in sezione laterale della flangia con quote per la definizione dei vincoli geometrici	10
2.2	Costruzione geometrica bobine	12
2.3	Struttura rotorica	14
2.4	Schematizzazione statore-aria-rotore	15
2.5	Vista 3-D della struttura	16
2.6	Flusso magnetico	17
2.7	Modello pspice	19
3.1	Assemblaggio flangia - pendolo	21
3.2	Sistema di riferimento angolare	22
3.3	Modello Harvester in Simulink	26
3.4	Maschera blocco Input	29
3.5	Editor blocco Input	29
3.6	Selezione della modalità transitoria blocco Input	30
3.7	Script della modalità transitoria blocco Input	31
3.8	Onda transitorio meccanico	32
3.9	Selezione della modalità costante	32
3.10	Esplorazione interna blocco Input	33
3.11	Inizializzazione blocco Input	34
3.12	Maschera blocco Pendulum	35
3.13	Esplorazione interna blocco Pendulum	36
3.14	Calcolo della massa	36
3.15	Cinematica del pendolo	37
3.16	Maschera del blocco CoilMagnet	38
3.17	Script per la costruzione delle mappe	40
3.18	Inizializzazione blocco CoilMagnet	41
3.19	Esplorazione interna blocco CoilMagnet	42
3.20	Suddivisione interna blocco CoilMagnet	43
3.21	Blocco circuitale RL+R//RC	44
3.22	Blocco circuitale RL+RC	45
4.1	Geometria pendolo	48
4.2	Scomposizione settore circolare rappresentante il pendolo	51

4.3	Variazione della struttura pendolo al variare di α	54
4.4	Pendolo a 2 masse	56
4.5	Pendolo a 3 masse	57
4.6	Pendolo a 4 masse	58
4.7	Pendolo a 5 masse	59
4.8	Confronto di Δ in funzione di α nelle varie configurazioni . . .	63
4.9	Confronto di γ in funzione di α nelle varie configurazionii . . .	64
4.10	Confronto di d in funzione di α nelle varie configurazionii . . .	65
4.11	Confronto di β in funzione di α nelle varie configurazioni . . .	66
4.12	Confronto di R_2 in funzione di α nelle varie configurazionii . .	67
4.13	Confronto di M in funzione di α nelle varie configurazionii . .	68
4.14	Confronto di I_O in funzione di α nelle varie configurazionii . .	69
4.15	Confronto di y_G in funzione di α nelle varie configurazionii . .	70
4.16	Momento statico del caso a due palle e sue componenti	71
4.17	Momento statico del caso a due palle e sue componenti	72
4.18	Momento statico del caso a due palle e sue componenti	73
4.19	Confronto di T in funzione di α nelle varie configurazionii . . .	74
4.20	Pendolo a 3 masse	75
4.21	Variazione di T in funzione di α	76
5.1	Caratteristiche di posizione e velocità angolare della flangia con Input di velocità costante	78
5.2	Caratteristiche di posizione e velocità angolare della flangia con Input di velocità transitoria	79
5.3	Caratteristiche di posizione e velocità angolare del pendolo con Input di velocità costante	80
5.4	Caratteristiche di posizione e velocità angolare del pendolo con Input di velocità transitoria	81
5.5	Parametri elettrici blocco CoilMagnet con Input di velocità costante	82
5.6	Parametri elettrici blocco CoilMagnet con Input di velocità transitoria	83
5.7	Coppia meccanica per ingresso costante	84
5.8	Coppia meccanica per ingresso transitorio	84
6.1	Modello 3-D: Vista in sezione e vista frontale	86
6.2	Modello 3-D prototipo energy harvester	86

Capitolo 1

Energy Harvester

1.1 Introduzione

Il lavoro presentato in questa tesi deriva dallo studio del recupero dell'energia tramite dispositivi chiamati energy harvester. Il lavoro é strutturato in modo da fornire un'introduzione generale sul mondo dell'energy harvesting (Capitolo 1) e sul suo stato dell'arte, presentando le varie tecniche di recupero dell'energia e le varie fonti e descrivendo il tipo di applicazione che si vuole sviluppare. Dopo questa introduzione, definita l'applicazione del caso specifico si illustrano le tecniche di progettazione del dispositivo, descrivendo la parte elettrica (Capitolo 2) e la parte meccanica (Capitolo 3), introducendo i concetti di base per lo sviluppo dei modelli di simulazione in ambiente MATLAB - Simulink. Costruito il modello, (Capitolo 4) si passa alla risoluzione dei problemi tecnici di questa applicazione e allo studio geometrico della struttura per risolvere i problemi di vincoli strutturali che l'applicazione impone. Dopodiché usando il modello di simulazione si fanno le prove di simulazione e si analizzano i risultati ottenuti (Capitolo 5) che portano a soluzioni utili per la realizzazione di un futuro prototipo (Capitolo 6).

1.2 Energy Harvesting e fonti per il raccoglimento dell'energia

L'idea di sviluppare le tecnologie senza fili, autonome e con una vita infinita ha permesso l'avvio di tecniche per il recupero dell'energia persa fin dall'inizio degli anni '90. Per Energy Harvester si intende un dispositivo atto a raccogliere l'energia dell'ambiente per renderla direttamente disponibile come energia elettrica dopo un processo di conversione dell'energia. Tipicamente gli energy harvester sono utilizzati per alimentare carichi a bassa potenza come i dispositivi elettronici. L'obiettivo del dispositivo può essere usare l'energia raccolta istantaneamente per alimentare dei carichi o ricaricare temporaneamente dispositivi di immagazzinamento dell'energia elettrica come super condensatori o batteria al litio con film sottile. L'energia da raccogliere e convertire in energia elettrica può essere proveniente da varie sorgenti che sono classificate in cinque differenti categorie:

- **Energia Elettromagnetica:** energia proveniente dalle trasmissioni radiotelevisive o teoricamente da qualsiasi emissione elettromagnetica che è possibile recuperare tramite la progettazione di un'antenna la quale converte le onde elettromagnetiche in una corrente elettrica;
- **Energia Cinetica:** è presente nell'ambiente sotto forma di vibrazioni o moti intermittenti. Si tratta dell'energia che ha attratto maggior interesse come sorgente per gli harvester. Esistono vari approcci per descriverla e tipicamente i dispositivi che sono basati su questo principio usano delle masse mosse dall'eccitazione della sorgente e la sua energia cinetica viene convertita attraverso dei trasduttori meccanici. Esistono vari tipi e uno è il trasduttore elettrostatico, dove il movimento della massa è accoppiato alle armature di un

condensatore meccanicamente variabile e le vibrazioni meccaniche che agiscono contro il campo elettrico inducono variazioni di carica sulle piastre e, quindi, corrente nel circuito connesso. Esistono poi trasduttori di tipo piezoelettrico dove il movimento della massa induce stress meccanico nel materiale piezoelettrico generando la separazione delle cariche e quindi corrente elettrica nel circuito connesso. Infine ci sono i trasduttori a induzione elettromagnetica dove il movimento della massa causa variazioni di flusso elettromagnetico a un avvolgimento collegato, che per la legge di Faraday genera una tensione indotta ai suoi capi.

- **Energia Luminosa:** energia proveniente di solito dal sole e immagazinata tramite celle fotovoltaiche che grazie a materiali come il silicio monocristallino, il silicio policristallino e il telleruro di cadmio permettono di convertire la luce in energia elettrica, in quanto quando la luce incontra questi materiali parte dei fotoni viene assorbita e l'energia del fotone é trasferita a un elettrone che é capace di lasciare la sua normale e di fluire all'interno del semiconduttore diventando una corrente elettrica.
- **Energia Termica:** che é trasformata in elettrica tramite generatori termoelettrici che, in presenza di gradienti termici o fluttuazioni di temperatura, inducono tensione elettrica. Gli harvesters per l'energia termoelettrica sono basati sull'effetto di Seebeck, dove le termocoppie composte da giunzione alternate di semiconduttori di tipo n e di tipo p collegate in serie elettricamente e in parallelo termicamente sono soggette a differenza di temperatura.
- **Energia Chimica:** si basa principalmente su due vettori energetici: biocarburanti enzimatici e contenuto di sale nei fluidi.

Il caso in esame prenderà come sorgente l'energia cinetica di una parte in movimento rotatorio, dove si usano dispositivi che basano il loro principio di funzionamento sulle macchine elettriche.

1.3 Confronto fra motori a flusso assiale e motori a flusso radiale

Teoricamente ogni macchina elettrica rotante può essere realizzata o utilizzando una struttura a flusso radiale oppure utilizzando una struttura a flusso assiale. La figura 1.1 riporta gli schemi di principio per la realizzazione di queste due strutture.

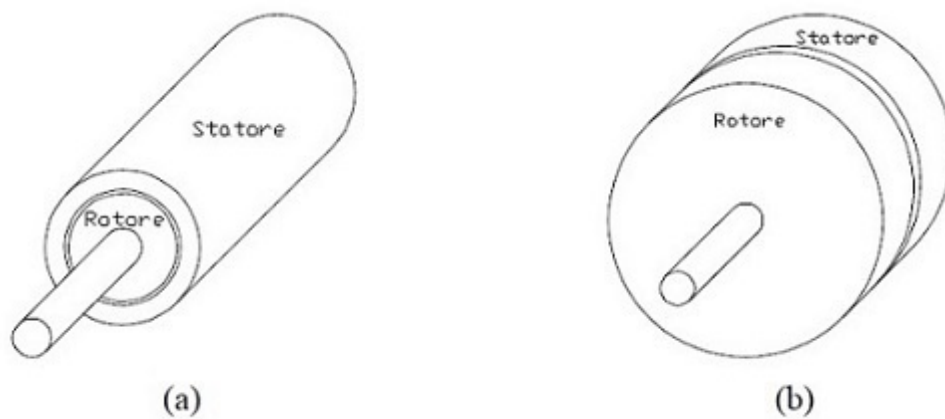


Figura 1.1: Possibili strutture per la realizzazione di macchine elettriche rotanti: (a) struttura radiale (b) struttura assiale

Nelle macchine a flusso radiale il flusso è diretto in direzione radiale, mentre nelle macchine a flusso assiale il flusso è diretto assialmente. Con ciò cambiano, però, anche le superfici utili per la produzione di coppia, ovvero le superfici dove sono disposti i conduttori. Per le macchine a flusso assiale, è possibile realizzare strutture multistadio, cioè macchine aventi uno o più statori ed uno o più rotori. Ciò porta ad un aumento delle superfici utili per la produzione della coppia e quindi ad una maggiore densità di coppia. Con riferimento ai motori a magneti permanenti si vo-

gliono ora elencare alcuni vantaggi e svantaggi per le due strutture in esame. Per le macchine a flusso radiale a fronte dei vantaggi rappresentati dal bilanciamento delle forze attrattive tra statore e rotore, alla facilità di asportazione del calore dalla superficie esterna di statore e dal basso momento di inerzia, vi sono gli svantaggi legati alla presenza di un unico traferro disponibile per la generazione della coppia, alla necessità di avere magneti con un lato curvo se affacciati al traferro, alla non regolabilità del traferro in fase di montaggio ed all'aggiunta al traferro dello spessore di collante necessario al fissaggio dei magneti. Per quanto riguarda i motori a flusso assiale, a fronte dei vantaggi legati alla presenza di più superfici utili alla produzione di coppia (strutture multistadio), alla presenza di magneti con superfici piane anche se direttamente affacciati al traferro, al traferro regolabile durante l'assemblaggio ed alla relativa facilità di realizzazione degli avvolgimenti di statore, ci sono gli svantaggi legati alla scarsa utilizzazione degli avvolgimenti (eccessiva lunghezza delle testate esterne) e all'impossibilità di eliminare il cogging con uno skewing lineare.

1.4 Tipologie costruttive per macchine a flusso assiale

Le tipologie costruttive per le macchine a flusso assiale sono sostanzialmente tre:

- Uno statore e un rotore (AFPM - 11, acronico di Axial Flux Permanent Magnet): la più semplice struttura per la realizzazione di motori a flusso assiale. Lo statore ha sostanzialmente la forma di un toro a sezione rettangolare. In macchine con presenza di cave esse sono ricavate su un solo lato dello statore e sono disposte radialmente. Talvolta possono essere disposte in modo leggermente obliquo allo scopo di attenuare la coppia di cogging. Il rotore è costituito da un disco metallico dove, sul lato che si affaccia verso lo statore, sono posizionati i magneti (magnetizzati in direzione assiale).
- Uno statore e due rotor (AFPM - 12): questa struttura prevede uno statore e due rotor. Lo statore può essere visto come due statori del tipo AFPM - 11, incollati tra loro sui lati privi di cave. I rotor sono perfettamente identici a quello della struttura AFPM - 11 e sono disposti sui due lati esterni dello statore. In questa struttura i magneti dei due rotor si possono presentare con i due poli nord affacciati oppure con un polo nord ed un polo sud affacciati. Nel primo caso è come avere due macchine AFPM - 11 attaccate, quindi a parità di diametro del motore si ha una coppia doppia. Nel secondo caso, il flusso attraversa lo statore assialmente e non circonferenzialmente, quindi l'estensione assiale dello statore non è più dipendente dal flusso che lo attraversa (porta problemi di saturazione).
- Due statori e un rotore (AFPM - 21): questa struttura prevede due statori ed un rotore. Ognuno dei due statori è realizzato in modo identico a quello del motore AFPM - 11. Il

rotore invece è costituito da un disco di materiale non magnetico sul quale sono ricavati gli alloggiamenti per i magneti, e viene sistemato tra i due statori. Questa struttura a parità di diametro, avendo due superfici utili alla produzione di coppia, presenta una densità di coppia maggiore rispetto alla struttura AFPM - 11.

1.5 Energy Harvester per il monitoraggio di un cuscinetto in una macchina agricola

Spesso gli energy harvester per il raccoglimento di energia cinetica vengono costruiti con l'uso di strutture a magneti permanenti a flusso assiale AFIPM (Axial Flux Interior Permanent Magnet) e non con motori a flusso radiale. Le ragioni per questa scelta costruttiva, sono dovute principalmente allo spazio a disposizione. Infatti i raccoglitori sono oggetti minuscoli e una struttura radiale non consentirebbe un'occupazione minuscola come quella assiale. Il caso di riferimento che viene usato per la progettazione del energy harvester da montare sulla flangia ruotante é del tipo assiale AFPM - 11. La progettazione di questo energy harvester é fatta tenendo conto della sua specificità di applicazione e quindi tenendo conto di tutti i vincoli di progetto che ne deriveranno e che in qualche modo andranno a influenzare le prestazioni del dispositivo. L'applicazione in esame in questa tesi é la realizzazione di un energy harvester per il monitoraggio da remoto di un cuscinetto in una macchina agricola. In particolare si vuole creare un energy harvester che raccolga energia dalla rotazione di una flangia meccanica rotante di un assolcatore agricolo che crea solchi nel terreno in cui verranno posti i semi.



Figura 1.2: Assolcatore agricolo

Il dispositivo viene quindi montato sulla flangia calettata tramite un cuscinetto su un albero che ruotando produce la sorgente di energia cinetica. Una volta recuperata l'energia e convertita in energia elettrica é possibile tramite moduli Bluetooth o trasmissione Wireless inviare le informazioni dello stato del cuscinetto su dispositivi elettronici quali smartphone o tablet per avere una verifica da remoto.

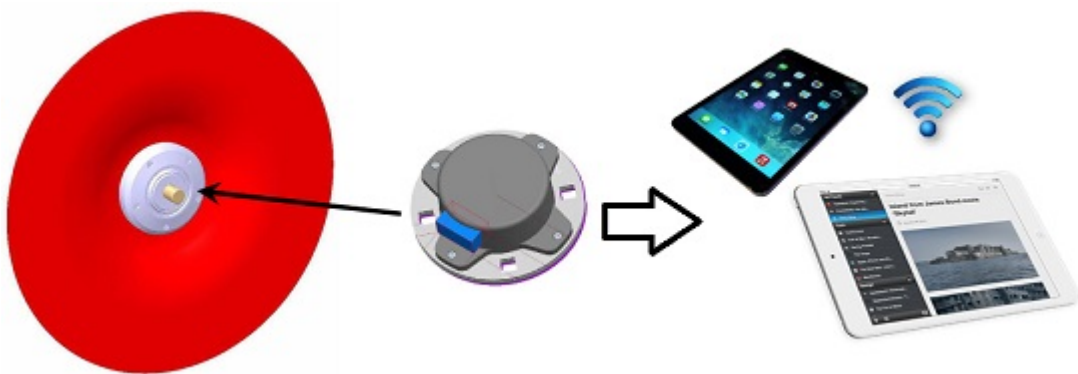


Figura 1.3: Assolcatore agricolo

Capitolo 2

Modello elettrico

2.1 Vincoli geometrici e modellizzazione del energy harvester

Il raccoglimento di energia passa attraverso lo studio dell'applicazione per il quale l'energy harvester é pensato. Nel caso in esame, come detto in precedenza, si costruisce un energy harvester in grado di recuperare energia dalla rotazione di una flangia calettata su un albero rotante tramite un cuscinetto. A questo proposito la conoscenza dell'applicazione, in questo caso del pezzo meccanico, porta a stabilire quelli che sono i vincoli geometrici di costruzione. Questi vincoli limitano lo sviluppo della struttura sia assialmente che radialmente. Infatti, l'energy harvester deve essere montato con la sua struttura discoidale in modo perfettamente assiale sulla flangia rotante e per far questo si dovranno rispettare a pieno i vincoli geometrici, assicurando cosí una perfetta aderenza dei dischi sulla flangia. Considerando una flangia generica, come da figura 2.1, si possono estrarre quelli che sono i vincoli geomtrici.

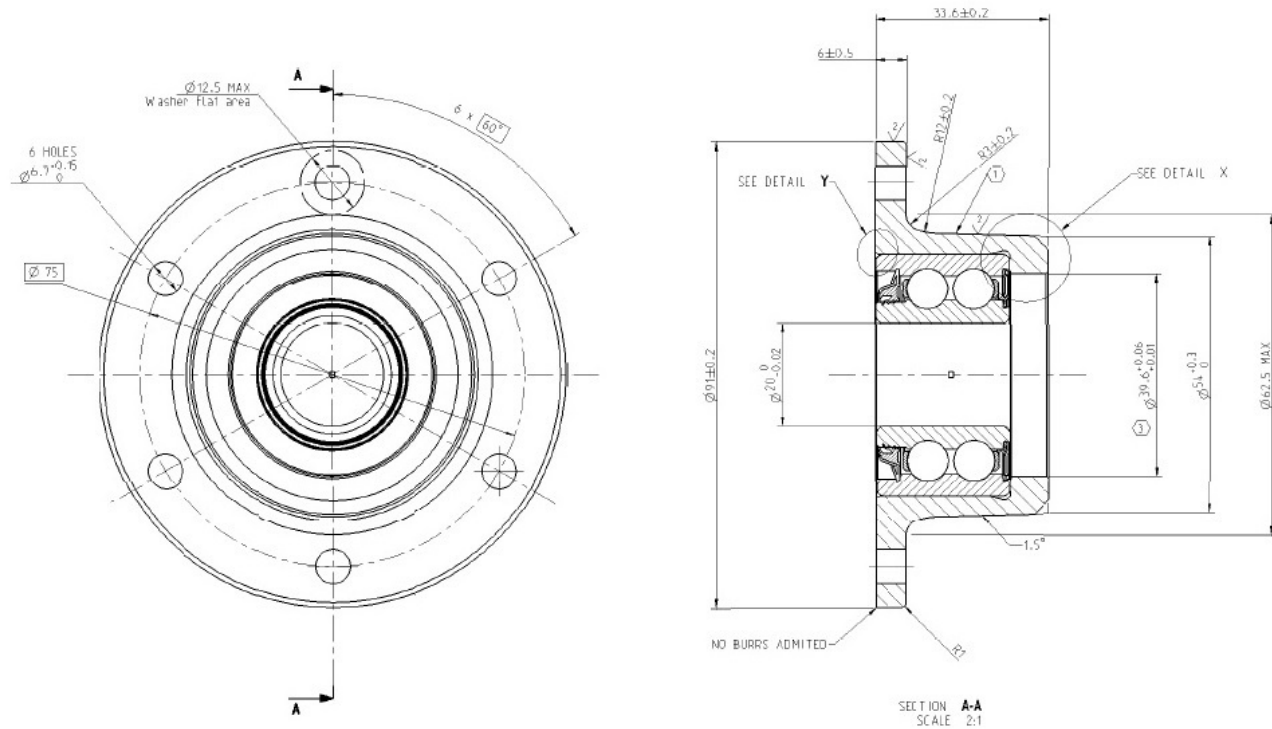


Figura 2.1: Vista frontale e in sezione laterale della flangia con quote per la definizione dei vincoli geometrici

Dal suo disegno quotato (Figura 2.1), si notano subito quali sono i vincoli geometrici lungo la direzione assiale (limitata a circa 27mm) e lungo quella radiale con due raggi che limiteranno i diametri dei magneti e delle bobine degli avvolgimenti. La differenza tra i due raggi (raggio interno $R1=29.5\text{mm}$ e raggio esterno $R2=45.5\text{mm}$) é il vincolo geometrico radiale (16mm). Definiti i vincoli geometrici si può passare al dimensionamento della struttura elettrica dell' energy harvester.

Esso é del tipo AFPM-11 in aria ironless, ovvero una struttura con uno statore e un rotore che non presenta cave. La macchina viene considerata come funzionante da motore, quindi la parte rotante dove sono presenti i magneti é il rotore, mentre la parte di macchina dove sono presenti gli avvolgimenti é lo statore. Entrambe le parti verranno dimensionate tenendo conto del fatto che oltre

ai vincoli geometrici si devono rispettare alcuni parametri affinché si riesca a recuperare abbastanza energia. Infatti avvolgimenti o magneti troppo piccoli possono portare a un recupero di energia insufficiente che rende inutile la costruzione stessa dell'energy harvester. Lo sviluppo delle caratteristiche del rotore e dello statore passa attraverso un programma scritto in ambiente Matlab, che usa le librerie di DualLab (Appendice B) e che prende come input i vincoli geometrici e restituisce come output la migliore configurazione per gli avvolgimenti statorici e il calcolo del flusso concatenato.

2.1.1 Dimensionamento statore

La struttura statorica prevede il dimensionamento delle bobine collegate in controserie che vanno a costituire l'avvolgimento statorico. Esse sono costruite nel piano del disco e ciascuna bobina occupa un settore circolare di ampiezza pari a:

$$\tau = \frac{2\pi}{N_{pol}} \quad (2.1)$$

dove N_{pol} identifica il numero di poli. Per semplicità costruttive esse sono di forma circolare e il loro raggio è ottenuto tramite una relazione di tangenza. Le bobine devono stare in un settore circolare compreso tra i raggi R_1 e R_2 che sono dei vincoli strutturali.

Definite le distanze:

$$\bar{OA} = \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot \sin \frac{\tau}{2} \quad (2.2)$$

$$\bar{OB} = \frac{R_1 + R_2}{2} - R_1 = \frac{R_2 - R_1}{2} \quad (2.3)$$

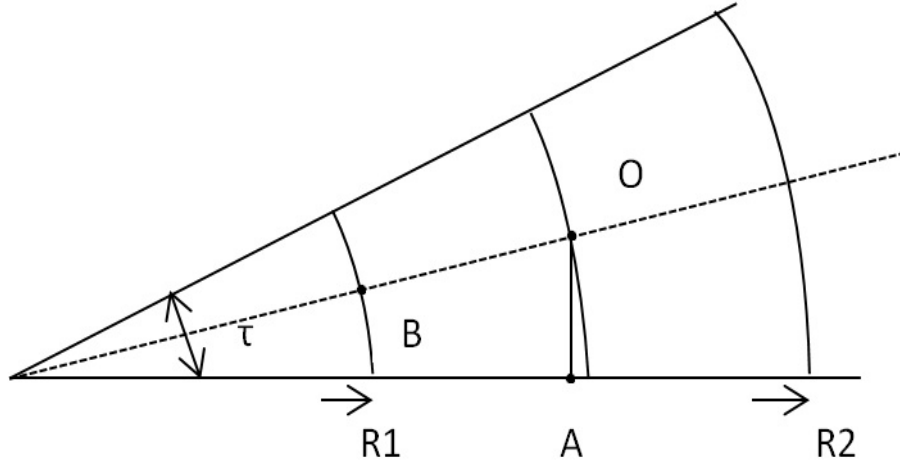


Figura 2.2: Costruzione geometrica bobine

Se la bobina fosse perfettamente circolare si ha che:

$$\bar{OA} = \bar{OB} \quad (2.4)$$

Quindi:

$$\frac{R_1 + R_2}{2} \cdot \sin \frac{\tau}{2} = \frac{R_2 - R_1}{2} \quad (2.5)$$

$$\sin \frac{\tau}{2} = \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.6)$$

Per evitare che il raggio possa superare il vincolo geometrico del settore circolare messo a disposizione per ogni bobina, si stabilisce che:

se

$$\sin \frac{\tau}{2} < \frac{R_2 - R_1}{R_1 + R_2} \quad (2.7)$$

allora si definisce il raggio massimo della bobina:

$$R_{coil} = \frac{R_1 + R_2}{2} \cdot \sin \frac{\tau}{2} \quad (2.8)$$

altrimenti R_{coil} sarà limitato

$$R_{coil} = \frac{R_2 - R_1}{2} \quad (2.9)$$

In questo modo viene definito il raggio massimo che l'avvolgimento può avere a disposizione senza violare i vincoli geometrici. Come detto in precedenza, questi calcoli verranno fatti da un programma scritto in ambiente Matlab, il quale ottenuti gli input iniziali (vincoli geometrici e geometria della bobina) resituisce le dimensioni della struttura statorica da adottare.

2.1.2 Dimensionamento rotore

La struttura rotorica presenta ovviamente una struttura a disco assialsimmetrico alla flangia sulla quale viene posato. I magneti formano una struttura ferromagnetica a N_{pol} di forma cilindrica con raggio R_{pill} e altezza assiale Z_{pill} . Il dimensionamento delle caratteristiche del magnete viene fatto gestendo il vincolo geometrico dello spazio assiale dividendolo in modo proporzionale fra magnete, aria e avvolgimenti, mentre il numero di poli N_{pol} verrà deciso in modo proporzionale per ottenere un energy harvester in grado di recuperare abbastanza energia e che abbia una forma di f.e.m. più sinusoidale possibile. Si suppone nota l'induzione residua del magnete B_r e che la permeabilità del materiale pari a μ_0 , si modellizzano i magneti mediante una corrente superficiale che risulta essere uguale a:

$$I = \frac{B_r}{\mu_0} \cdot Z_{pill} \quad (2.10)$$

Questa corrente é discretizzata in N_z spire filiformi, ciascuna con corrente pari a $\frac{I}{N_z}$.

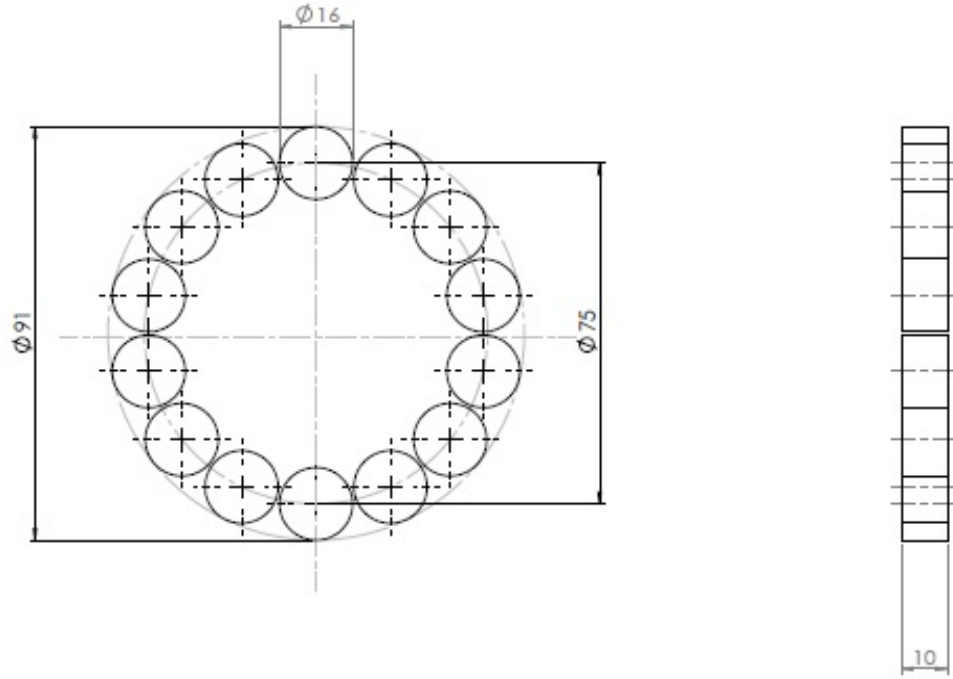


Figura 2.3: Struttura rotorica

2.2 Flusso massimo concatenato e tensione generata

Dopo aver dimensionato i parametri per il dimensionamento dello statore e del rotore in modo da non violare i vincoli geometrici ci si trova di fronte a una struttura fatta in questo modo:

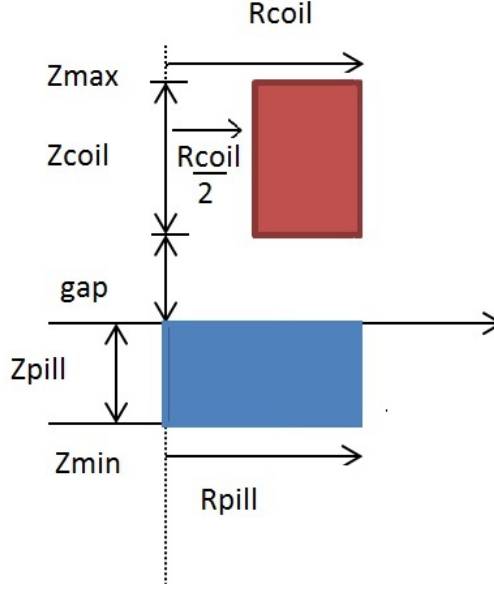


Figura 2.4: Schematizzazione statore-aria-rotore

Dallo schema é possibile vedere quali possano essere le distanze tra le varie parti del energy harvester, dove si é posto un coefficiente di riempimento per le spire statoriche pari a 0,5. A questo punto diventa facile ricavare la sezione di rame che occupa una bobina statorica:

$$S_{coil} = \frac{R_{coil}}{2} \cdot Z_{coil} \quad (2.11)$$

Definendo un diametro per i conduttori in rame (D_{wire}), si può calcolare il numero di spire nelle due direzioni di R_{coil} e Z_{coil} nel seguente modo:

$$N_r = \frac{R_{coil}/2}{D_{wire}} \quad (2.12)$$

$$N_z = \frac{Z_{coil}}{D_{wire}} \quad (2.13)$$

Il numero di spire N é quindi:

$$N_{turn} = N_r \cdot N_z \quad (2.14)$$

Entrambi i numeri di spire calcolati nelle due direzioni sono calcolati in modo da ottenere un numero approssimato intero di spire. Per visualizzare meglio la struttura dell'harvester, tramite simulazione in Matlab é possibile disegnare una struttura 3-D dell'accoppiamento magneti - aria - avvolgimenti:

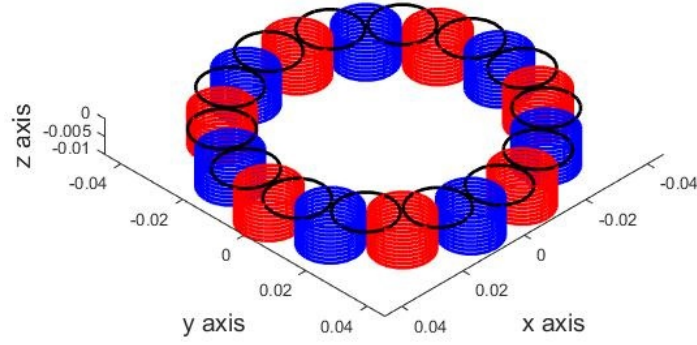


Figura 2.5: Vista 3-D della struttura

Nel grafico i cerchi neri rappresentano le bobine circolari statoriche mentre i cerchi colorati rappresentano i magneti con le loro polarità alternate NORD - SUD. Dalla figura é possibile notare la discretizzazione dei magnetici in bobine circolari. Per quanto riguarda il flusso magnetico concatenato, esso viene calcolato mediante il potenziale vettore magnetico creato da ciascuna spira circolare filiforme in cui é discretizzato il magnete. Il flusso magnetico viene calcolato mediante l'integrale di linea del potenziale vettore su di una singola bobina:

$$\varphi = \oint A \cdot dl \quad (2.15)$$

Esso varierá in funzione dell'angolo e sará una funzione quasi sinusoidale. Una perfetta sinusoidalitá si otterrebbe aumentando il numero dei poli ma, essendo la struttura vincolata radialmente al raggio esterno della flangia, un aumento eccessivo dei poli porterebbe a dover ridurre le dimensioni dei magneti.

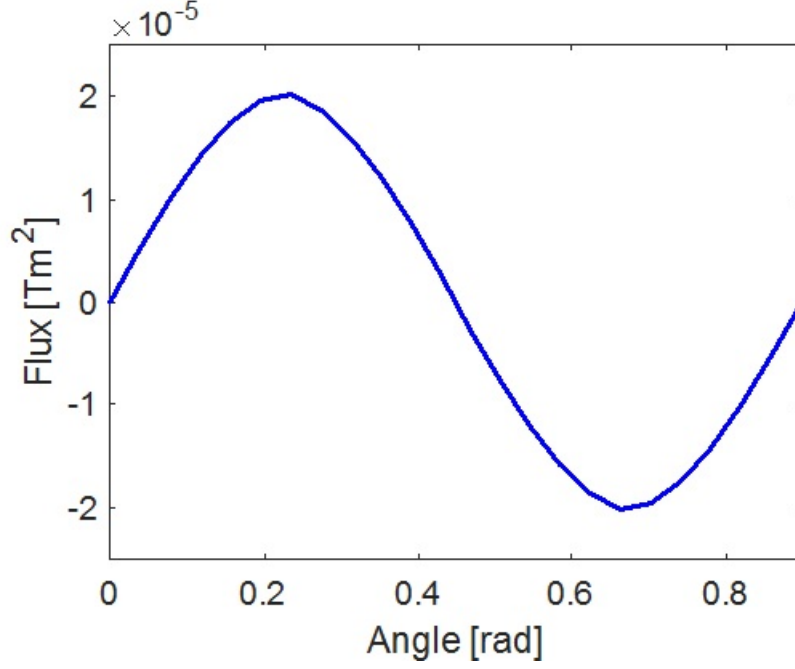


Figura 2.6: Flusso magnetico

Conoscendo la velocità a cui gira l'albero su cui é posata la flangia a cui viene applicato l'energy harvester, si può ricavare la pulsazione elettrica e calcolare in modo approssimato la tensione massima di prima armonica per una singola bobina:

$$\omega_{el} = \frac{N_{pol}}{2} \cdot \omega \quad (2.16)$$

$$e_{1max} = \frac{N_{pol}}{2} \cdot \omega_{el} \cdot N_{turn} \cdot \varphi_{max} \quad (2.17)$$

mentre per l'intero avvolgimento risulterà essere:

$$e_{max} = N_{pol} \cdot e_{1max} = \frac{N_{pol}^2}{2} \cdot \omega_{el} \cdot N_{turn} \cdot \varphi_{max} \quad (2.18)$$

2.3 Corrente indotta negli avvolgimenti e potenza recuperata

Ottenuta la tensione indotta nell'avvolgimento statorico, l'harvester viene modellizzato come un bipolo equivalente di Thevenin (generatore di tensione e impedenza interna dell'avvolgimento). Si può calcolare la corrente massima che fluisce nell'avvolgimento ipotizzando un carico resistivo che ha lo stesso valore della resistenza interna dell'avvolgimento (adattamento elettrico). La corrente massima che circola nell'avvolgimento é:

$$i_{max} = \frac{e_{max}}{2 \cdot R_{tot}} \quad (2.19)$$

dove R_{tot} rappresenta la resistenza di tutto l'avvolgimento statorico. Viene moltiplicata per 2 perché come detto prima il circuito esterno viene pensato come una resistenza uguale alla resistenza dell'avvolgimento. Ottenuta la corrente, la potenza massima viene calcolata come potenza dissipata per effetto Joule, ovvero:

$$p_{max} = R_{tot} \cdot I_{max}^2 \quad (2.20)$$

Per una verifica dei calcoli fatti si é creato un modello del sistema in Pspice nel quale il energy harvester é modellizzato come bipolo equivalente di Thevenin reale e il circuito esterno é formato da una parte di potenza modellizzata con un ponte di Graetz e un carico resistivo.

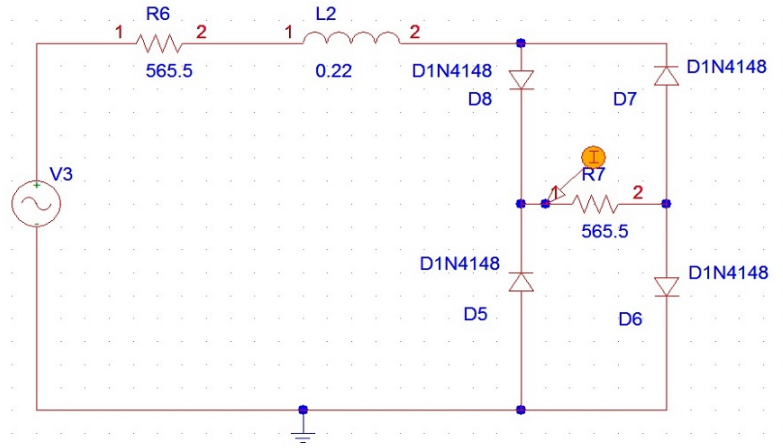


Figura 2.7: Modello pspice

2.4 Riepilogo dati del energy harvester per flangia rotante

Dati e vincoli	Risultati
$R_1 = 29,5$ [mm]	$R_{coil} = 8$ [mm]
$R_2 = 45,5$ [mm]	$S_{coil} = 40$ [mm ²]
$B_r = 1$ [T]	$N_r = 22$
$N_{pol} = 14$	$N_z = 56$
$R_{pil} = 8$ [mm]	$N_{turn} = 1232$
$Z_{pil} = 10$ [mm]	$R_{tot} = 565.5$ [Ohm]
$D_{wire} = 0,180$ [mm]	$L = 0,22$ [H]
$\omega = 14.62$ [rad/s]	$e_{max} = 35.58$ [V]
	$i_{max} = 0.03$ [A]
	$p_{max} = 0.56$ [W]

Capitolo 3

Modello meccanico

3.1 Equazioni meccaniche

L'analisi del modello meccanico passa attraverso lo studio delle equazioni della cinematica che governano il fenomeno. Ci si trova a studiare un sistema formato da una flangia calettata su un albero rotante a velocità di regime $\omega = 14.62 rad/s$ e un sistema pendolo calettato anche esso sullo stesso albero, che si comporta da massa oscillante e permetterà agli avvolgimenti statorici di non seguire la flangia ruotante creando una differenza di velocità tra le due parti. Inizialmente non conoscendo le reali caratteristiche meccaniche dell'energy harvester si usa un pendolo dimensionato come in figura 3.1. La conoscenza delle caratteristiche meccaniche passerà attraverso lo studio dell'equazione di accoppiamento elettro - meccanico.

$$I_O \ddot{\vartheta} + (C_{el} + C_m)(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{inp}) + mgl \sin \vartheta = T_r \quad (3.1)$$

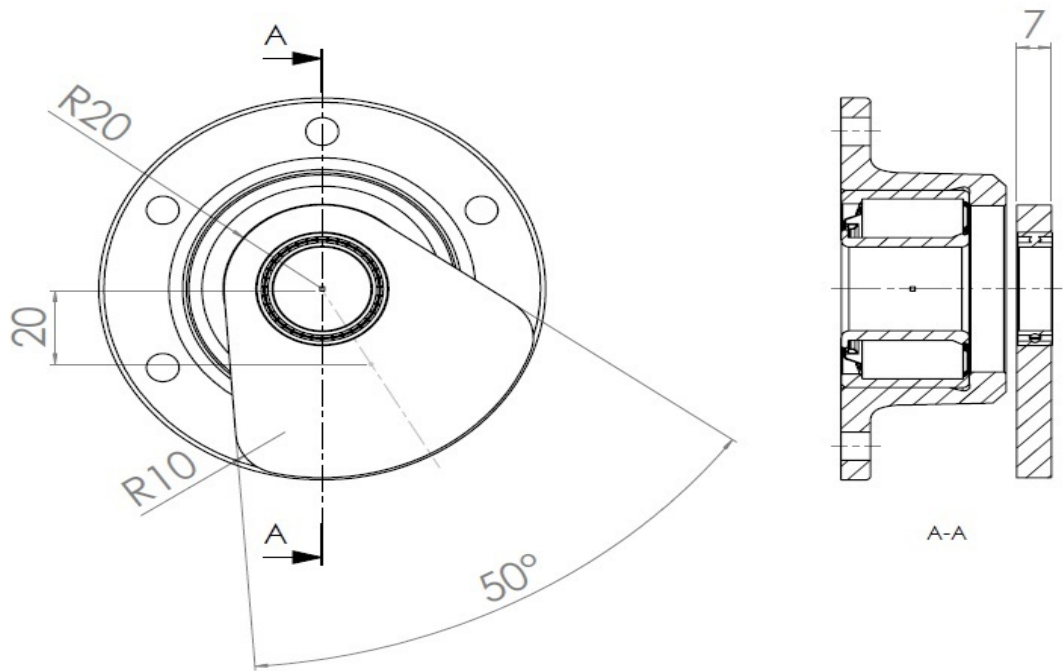


Figura 3.1: Assemblaggio flangia - pendolo

I termini dell'equazione rappresentano:

- I_O é il momento d'inerzia calcolato nel centro del foro che risulta essere uguale a $I_G + ml^2$. I_G (momento di inerzia baricentrico del pendolo) espresso con il raggio di inerzia é $m\rho^2$, quindi dal teorema di HuyGens - Steiner risulta:

$$I_O = I_G + ml^2 = m(\rho^2 + l^2) ;$$
- $\ddot{\vartheta}$ é la accelerazione angolare subita dal pendolo (derivata seconda dell'angolo);
- C_{el} é il coefficiente di coppia elettrica dovuta all'accoppiamento meccanico - elettrico che produce potenza utile;
- C_m é il coefficiente della coppia meccanica di dissipazione dovuta agli attriti di accoppiamento tra pendolo e cuscinetto;
- $\dot{\vartheta}$ é la velocità angolare a cui é sottoposto il pendolo (derivata prima dell'angolo);
- $\dot{\vartheta}_{inp}$ é la velocità angolare a cui gira l'albero;

- m é la massa del pendolo;
- g é l'accelerazione di gravità;
- l é la distanza tra il centro del foro del pendolo e il punto baricentrico del pendolo;
- ϑ é l'angolo di inclinazione del pendolo;
- T_r rappresenta le coppie di reazione che arrivano dall'esterno. In essa sono presenti anche delle coppie di dissipazioni meccaniche.

Tutti i componenti dell'equazione (3.1) verranno riferiti a un sistema di riferimento.

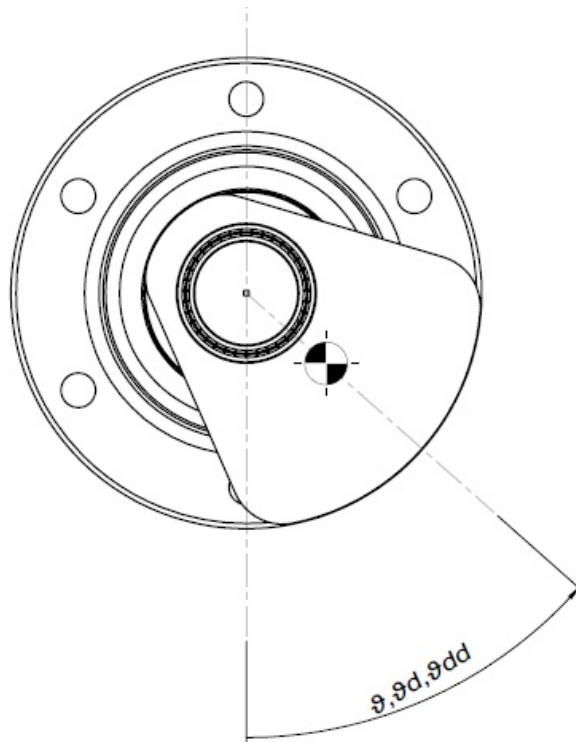


Figura 3.2: Sistema di riferimento angolare

L'accoppiamento elettro - meccanico si basa sul fatto che:

$$P_{el} = P_m \quad (3.2)$$

ovvero, considerando trascurabili le perite, la potenza elettrica e la potenza meccanica si equivalgono. Dallo studio del modello elettrico si ha già la conoscenza della potenza elettrica, mentre per quanto riguarda la potenza meccanica si può affermare che:

$$P_m = T_m \cdot \omega \quad (3.3)$$

ricordando la (3.2) si può affermare che:

$$T_m = \frac{P_{el}}{\omega} \quad (3.4)$$

dove:

$$P_{el} = e \cdot i \quad (3.5)$$

e

$$\omega = \frac{d\vartheta}{dt} \quad (3.6)$$

dalla Legge di Lentz si sa che:

$$e = -\frac{d\lambda}{dt} \quad (3.7)$$

sostituendo la 3.5 , 3.6 e 3.7 nella 3.4 si ottiene:

$$T_m = -\frac{d\lambda}{d\vartheta} \cdot i \quad (3.8)$$

Applicando l'analisi dimensionale si può effettivamente constatare che il risultato ottenuto é una coppia. Infatti:

$$\left[N \cdot m \right] = \left[\frac{T \cdot m^2}{rad} \cdot A \right] \quad (3.9)$$

ma:

$$\left[N \right] = \left[\frac{T \cdot m \cdot A}{rad} \right] \quad (3.10)$$

Quindi sostituendo la 3.10 nella 3.9 l'equivalenza é verificata.

Conoscendo la coppia meccanica si può scrivere:

$$P_m = T_m \cdot \omega = (C_{el} + C_m)(\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{inp}) \cdot (\dot{\vartheta} - \dot{\vartheta}_{inp}) \quad (3.11)$$

Ritornando all'equazione 3.1 si può concludere il processo di accoppiamento elettro - meccanico. Infatti dalla 3.11 si possono ricavare ora i coefficienti della coppia meccanica ed elettrica e risolvere l'equazione di legame elettro - meccanico.

3.2 Introduzione a Simulink e logica dei blocchi

L'analisi delle prestazioni funzionali dell' energy harvester in esame passa attraverso la modellizzazione dello stesso in ambiente Matlab tramite l'uso di Simulink. Esso si presta perfettamente alla modellizzazione e alla simulazione di sistemi dinamici descritti tramite equazioni differenziali. Permette inoltre la simulazione di sistemi complessi di ordine elevato, non lineari e con segnali di riferimento complessi. La simulazione avviene in due passi:

- Descrizione del sistema mediante schema a blocchi;
- Simulazione del sistema.

La descrizione del sistema mediante schema a blocchi può essere fatta grazie alla libreria di blocchi di Simulink che descrivono elementi algebrici e dinamici elementari, quali funzioni di trasferimento, guadagni, saturazioni e varie funzioni matematiche. L'utente in questo modo compone lo schema a blocchi del sistema da simulare mediante l'interconnessione dei blocchi elementari. La simulazione del sistema invece, avviene attraverso l'integrazione delle equazioni in un certo intervallo di tempo impostato. Simulink è in grado di interagire con Matlab mediante il workspace e i modelli Simulink possono contenere variabili del workspace. Allo stesso modo i risultati delle simulazioni possono essere esportati su Matlab tramite il workspace e analizzati. La modellizzazione dell' energy harvester viene suddivisa in alcuni blocchi principali che in modo semplice e immediato permetteranno di suddividere le caratteristiche del suo funzionamento in punti principali. Ogni blocco principale viene associato all'immagine di quello che rappresenta la sua funzionalità e di quello che contiene al suo interno. I blocchi comunicano tra loro attraverso dei collegamenti (freccie nere, le rosse indicano il mancato collegamento) che trasportano informazioni (velocità, coppie, ecc).

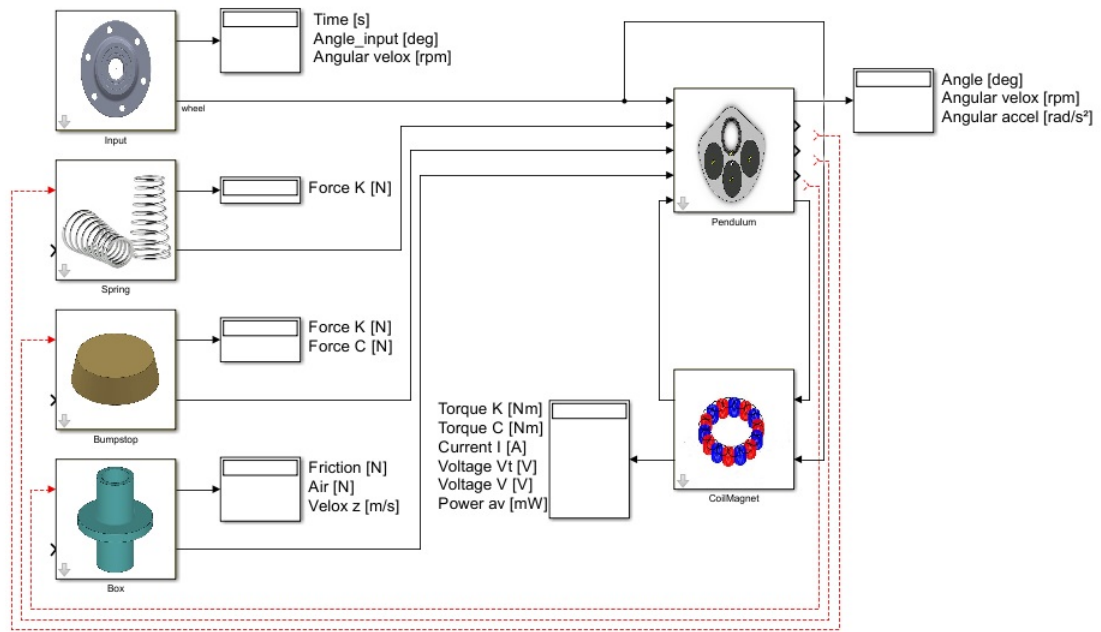


Figura 3.3: Modello Harvester in Simulink

Dalla figura si nota come il energy harvester venga modellizzato da 6 blocchi principali che sono:

- Input: in grado di definire il tipo di ingresso (transitorio o costante);
- Pendulum: nel quale viene definita la cinematica del pendolo;
- CoilMagnet: nel quale sono contenute le equazioni di accoppiamento meccanico - elettrico (esiste un anello chiuso tra il blocco CoilMagnet e Pendulum);
- Spring: nel quale sono contenute le equazioni della predisposizione di eventuali molle;
- Bumpstop: contenente le equazioni dei bumpstop, predisposti per fermare la corsa del pendolo;
- Box: contenente le equazioni delle coppie sviluppate dalla scatola esterna che contiene tutto l'harvester.

Ciascuno di questi blocchi é in grado di leggere informazioni dall'esterno (altri file o dati impostati dall'utente) riguardo grandezze, parametri, tramite finestre dette "maschere". In uscita da questi blocchi, vengono stampati su dei display alcune delle grandezze che vengono elaborate durante la simulazione. Questa suddivisione in blocchi principali permette una migliore gestione di tutte le variabili e una piú facile risoluzione dei problemi in caso di errore. Infatti, se tutte le equazioni fossero scritte insieme, il sistema sarebbe complesso da analizzare e la ricerca di un eventuale errore diventerebbe quasi impossibile.

3.3 Modello del energy harvester per cuscinetto volvente

La modellizzazione del energy harvester per cuscinetto volvente prevede un modello in cui non tutti i blocchi principali vengono usati. Infatti dei sei blocchi principali, ne vengono utilizzati principalmente tre con opzione per il quarto. I blocchi usati, sono:

- Input;
- Pendulum;
- CoilMagnet.

Ognuno di questi blocchi contiene al suo interno blocchi elementari che descrivono le equazioni che governano la funzionalità del blocco e maschere che gli permettono di comunicare con l'esterno. L'analisi dei singoli blocchi che costituiscono il modello dell'energy harvester per questo caso specifico ci porta a strutturare l'interno dei singoli blocchi nel seguente modo.

3.3.1 Blocco Input

Il blocco Input come detto in precedenza è il blocco che permette di assegnare il tipo di ingresso dinamico che si ha intenzione di simulare. La maschera prevede due tipi di Input che non possono essere dati contemporaneamente. Il selettore permette di scegliere il tipo di input da dare. La scelta può ricadere tra due diversi tipi di funzionamento:

- Transitorio
- Costante

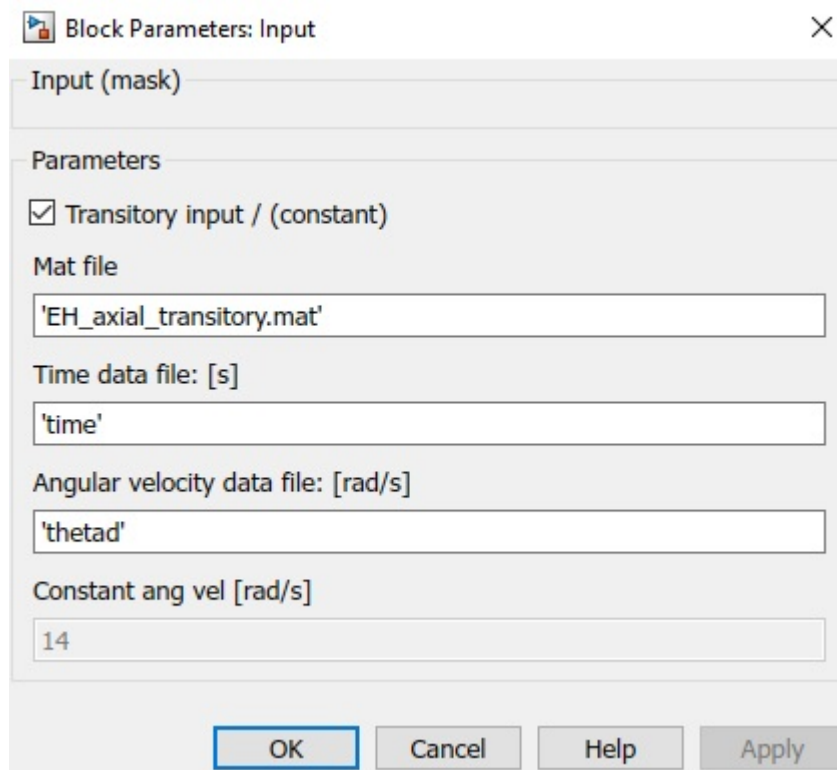


Figura 3.4: Maschera blocco Input

Il selettore viene impostato nell'editor della maschera, nella sezione Parametri tramite la selezione della voce 'checkbox' dal menù a tendina nella categoria 'type'. Esso viene poi abilitato alla selezione esclusiva tramite la scrittura di un 'if' con delle righe di comando nella 'dialog callback'.

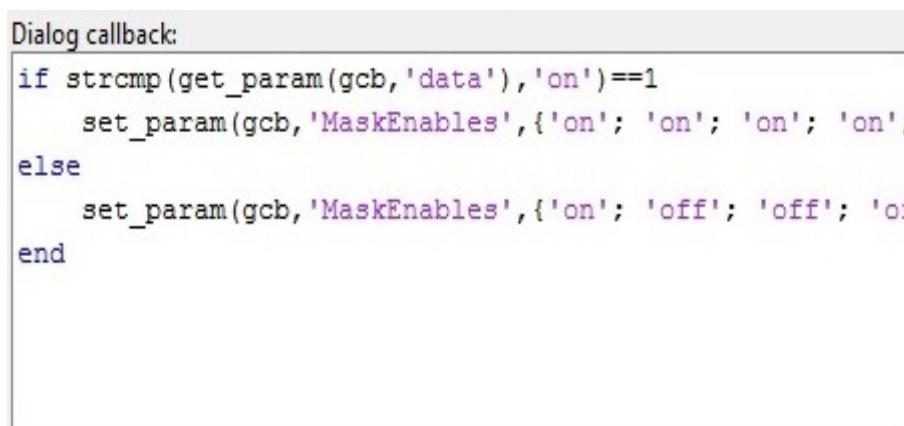


Figura 3.5: Editor blocco Input

Il funzionamento in transitorio sottopone il sistema a un transitorio di velocità del secondo ordine con risposta del sistema sottosmorzata nel quale si ipotizza uno stato iniziale dell'albero motore $\omega = 0$ rad/s e uno stato di regime $\omega = 14.62$ rad/s, raggiunto dopo un tempo $\tau = 5$ s. L'informazione di questo transitorio viene data al sistema tramite la lettura di un file .mat, il quale racchiude le informazioni riguardanti tempo e velocità durante il transitorio.

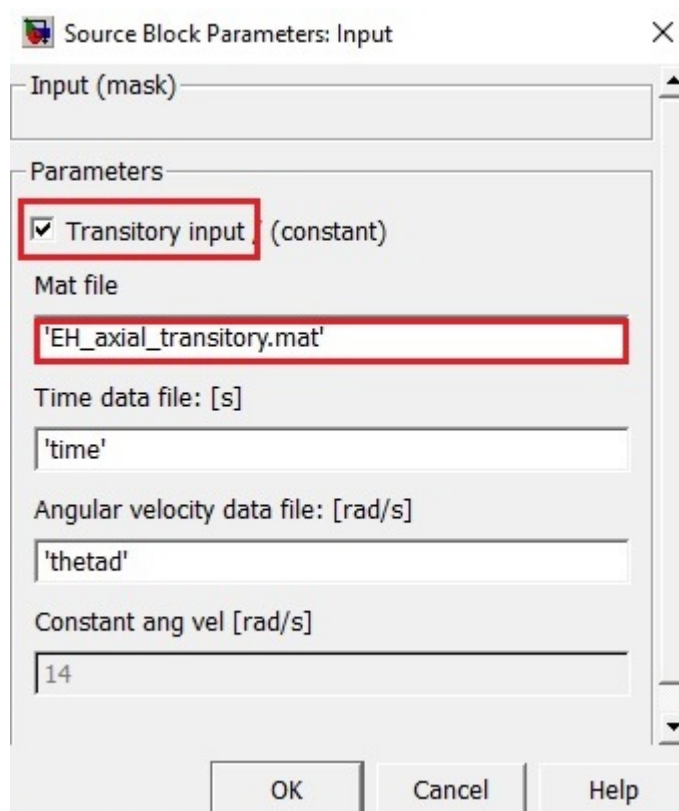


Figura 3.6: Selezione della modalità transitoria blocco Input

La funzione immagazzinata nel file .mat é il risultato di uno script (file.m) che produce tale andamento.

```
clear all;
close all;
clc;

w = 2;
zeta = 0.99; %with absolutely zeta<1
%calcolo nel tempo;
t = [0:1.4361e-4:25].';
G = 14.36*(1-1/(1-zeta^2)^0.5.*exp(-zeta*w.*t).*sin(w*(1-zeta^2)^0.5.*t+atan2((1-zeta^2)^0.5,zeta)));
figure()
plot(t,G);
```

Figura 3.7: Script della modalit  transitoria blocco Input

La descrizione in forma analitica della funzione contenuta in questo file  :

$$\dot{v}_{inp} = \dot{v}_{inp,0} \cdot \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cdot e^{-\zeta \cdot \omega_n \cdot t} \cdot \text{sen}(\omega_d t - \varphi) \right] \quad (3.12)$$

dove:

- $\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}}$   la pulsazione naturale;
- $\omega_d = \omega_n \cdot \sqrt{1-\zeta^2}$   la pulsazione in presenza di smorzamento;
- $\zeta = \frac{C}{2 \cdot \sqrt{k \cdot m}}$   lo smorzamento;
- $\varphi = \arctan\left(\sqrt{\frac{1-\zeta^2}{\zeta}}\right)$   lo sfasamento.

Nel file viene indicato che il parametro ζ deve essere assolutamente < 1 . In questo modo assicuriamo una risposta che non abbia una sovraelongazione e poi venga smorzata. Infatti otterremo una risposta del sistema che  :

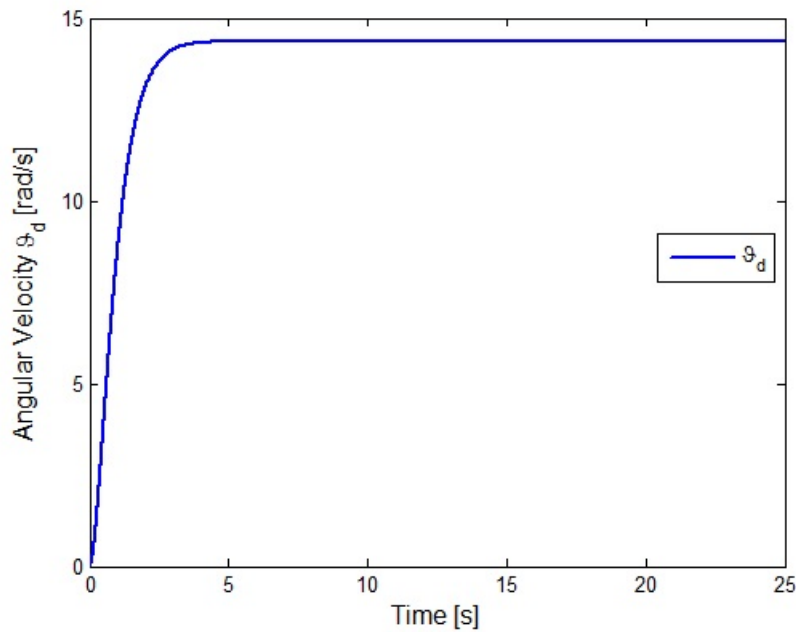


Figura 3.8: Onda transitorio meccanico

Il secondo funzionamento previsto, prevede un funzionamento a velocità costante senza un precedente transitorio di avviamento. Anche questa volta è possibile selezionare tale modalità tramite la spunta nel selettore. Selezionando la modalità 'Constant' il programma oscura i riquadri riguardanti il transitorio e abilita il riquadro per l'inserimento della velocità a cui si vuole far girare la flangia durante la simulazione.

Figura 3.9: Selezione della modalità costante

Guardando all'interno del blocco troviamo i blocchi elementari che permettono a Simulink di leggere i dati che gli arrivano dall'esterno (modalità transitoria o costante) e tramite le sue uscite di far uscire due variabili ϑ e $\dot{\vartheta}$ racchiuse nell'uscita (2).

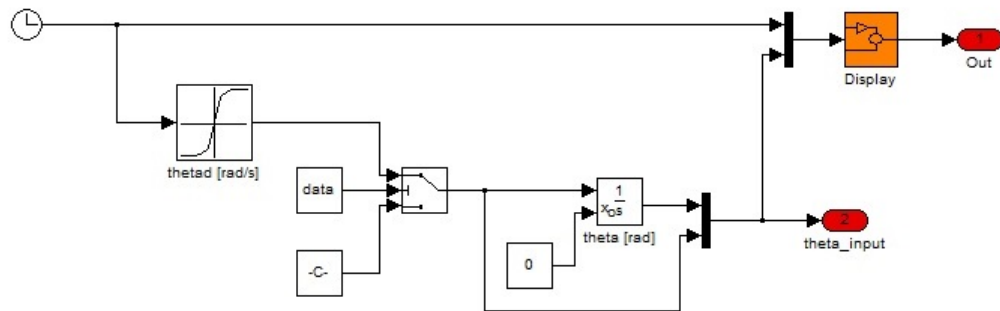


Figura 3.10: Esplorazione interna blocco Input

Dalla figura si nota il selettore che permette al sistema di leggere da un blocco 'Lookup Table' (modalità transitoria) che fa un'interpolazione mono - dimensionale dei valori in ingresso usando quelli nella tabella specificata (tabella letta dal file indicato nella maschera) ed estrapola i valori esterni alla tabella. Il selettore può anche leggere da un blocco 'Constant' (modalità costante). La selezione di lettura avviene seguendo un criterio: il selettore legge da ingresso 1 (Lookup Table) quando ingresso 2 (data) è maggiore di una soglia (0.5), altrimenti legge da ingresso 3 (Constant). Il blocco data rappresenta l'attivazione del selettore nella maschera. Esso è inizializzato nell'editor della maschera attraverso un if.

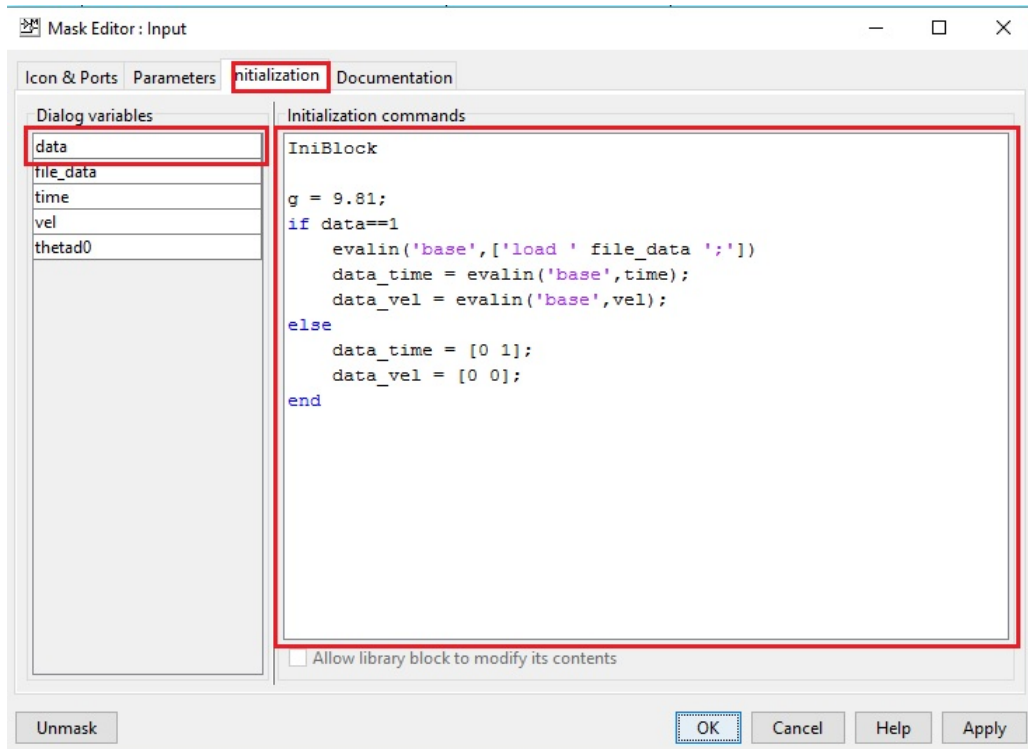


Figura 3.11: Inizializzazione blocco Input

L'uscita out contiene i valori delle variabili da stampare a display, mentre l'uscita (2) contiene le variabili che verranno mandate negli altri blocchi.

3.3.2 Blocco Pendulum

Il blocco Pendulum é il blocco all'interno del quale sono contenute le equazioni che descrivono la cinematica del sistema. Esso, adattato al energy harvester per flangia ruotante, descriverá la cinematica del pendolo. Il blocco presenta una maschera nel quale é possibile impostare i parametri l (lunghezza tra centro foro per calettamento su albero e centro di massa del pendolo), g (accelerazione di gravitá), volume, densitá e massimo angolo di inclinazione raggiunto dal pendolo.

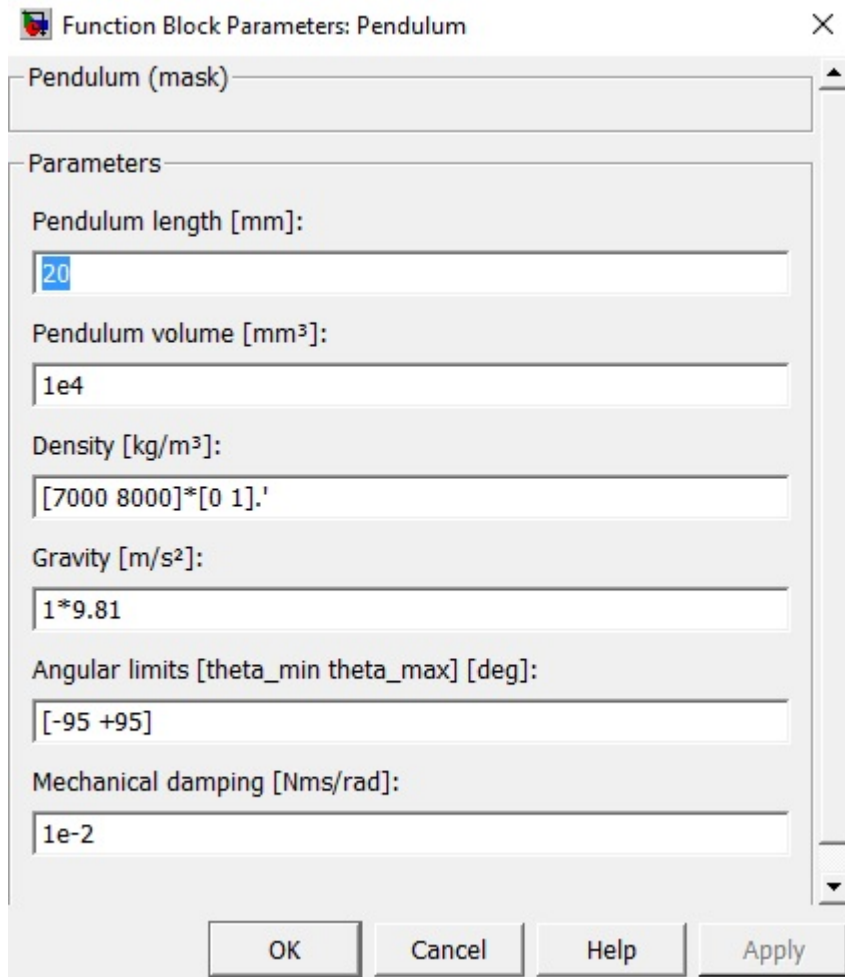


Figura 3.12: Maschera blocco Pendulum

L'interno del blocco Pendulum può essere diviso in due parti: la prima nella quale viene calcolata la massa, e la seconda nel quale vengono calcolate le equazioni per la cinematica.

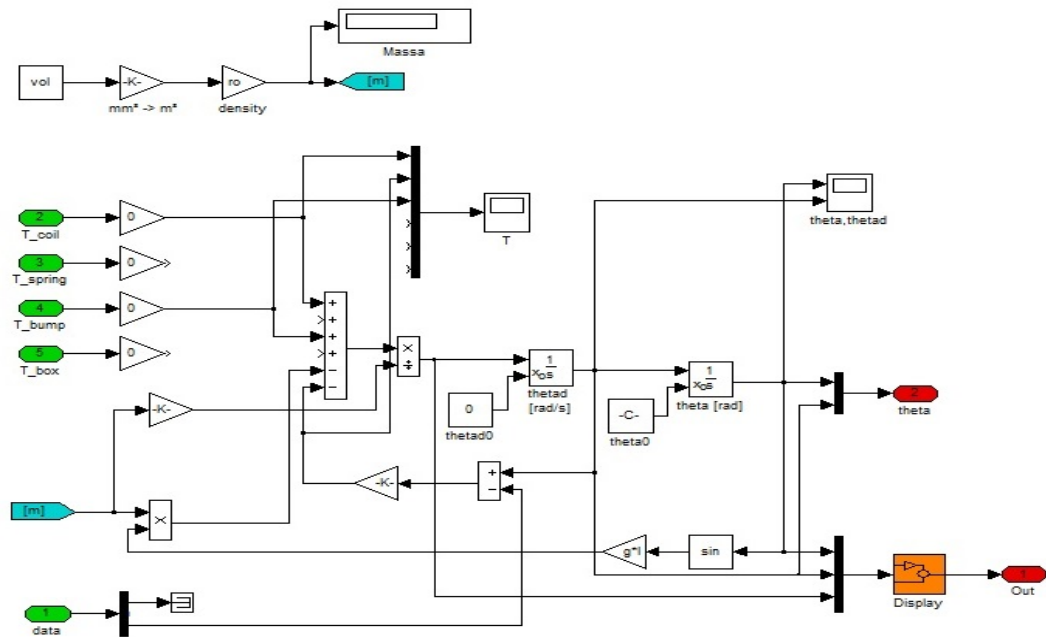


Figura 3.13: Esplorazione interna blocco Pendulum

Analizzando separatamente le due parti si nota che la prima parte, quella in alto, fa un semplice calcolo di massa applicando l'equazione matematica che dice:

$$m = \rho \cdot V \quad (3.13)$$

dove ρ indica la densità del materiale utilizzato.

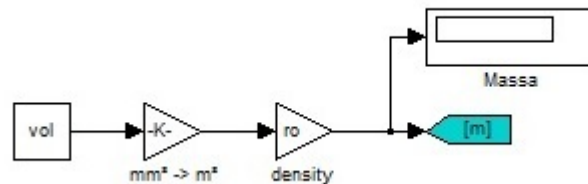


Figura 3.14: Calcolo della massa

La seconda parte prevede alcuni ingressi di coppia di reazione derivanti dagli altri blocchi (nel caso specifico sono previste solo le coppie dovute all'avvolgimento e ai bumpstop) che possono essere

non considerate se si mettono a 0 i guadagni. Gli altri ingressi non vengono considerati, ecco perché non viene effettuato alcun collegamento. Oltre agli ingressi delle coppie di reazioni ci sono anche l'ingresso data proveniente dal blocco input che contiene due informazioni: la posizione ϑ , che non viene utilizzata e la velocità angolare $\dot{\vartheta}$ che entra nell'equazione di cinematica (3.1) come variabile $\dot{\vartheta}_{imp}$.

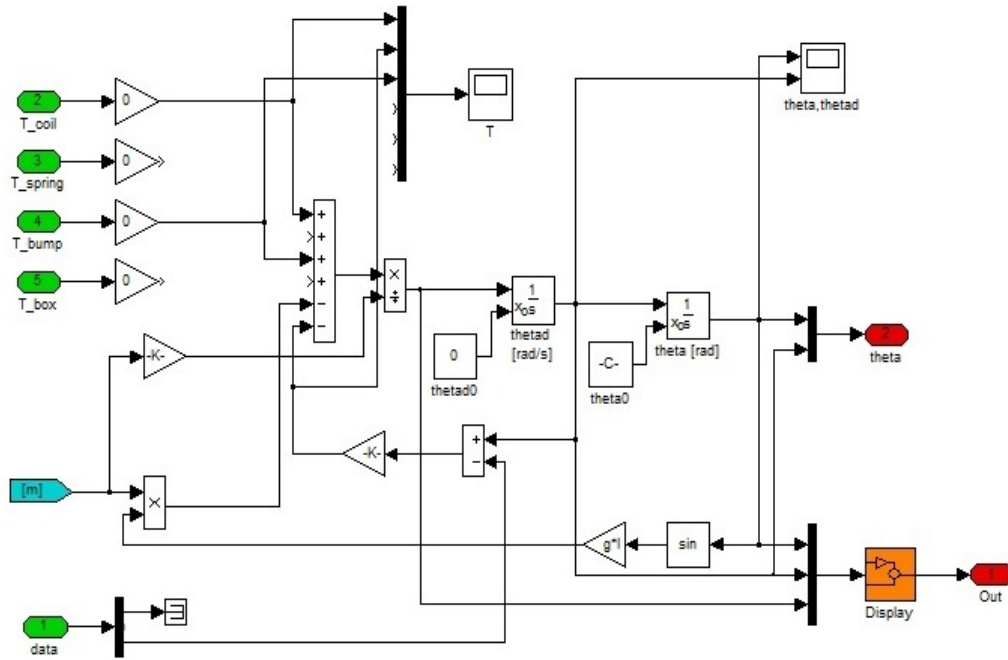


Figura 3.15: Cinematica del pendolo

Le uscite saranno due. Out contiene tre variabili (Angle, Angular velocity, Angular acceleration) che vengono stampate nel display del blocco e theta (2) che contiene Angle e angular velocity che sono usate come ingresso di altri blocchi. Le entrate e le uscite sono codificate con dei colori. L'azzurro viene usato per identificare le entrate e il rosso viene usato per le uscite.

3.3.3 Blocco CoilMagnet

Il blocco CoilMagnet é il blocco nel quale avviene l'accoppiamento tra il mondo elettrico e il mondo meccanico. Infatti in questo blocco vengono usati ingresso che sono i risultati degli studi e dei calcoli che sono stati fatti nel Capitolo precedente, ricavati grazie all'uso di DualLab. Anche questo blocco presenta una maschera nel quale sono contenute molte informazioni che possono essere inserite dall'utente.

Function Block Parameters: CoilMagnet

Magnetic flux map:

Material efficiency [-]:

Coil [dr,h1,l1t] [mm]:

Poles [-]:

Section diameter [mm]:

Packaging coeff. [-]:

Coil diameter [mm]:

Copper conductivity [S/m]:

☒ Adapted load
☐ Adapted R / (Adapted RLC)

R additional [Ohm]:

L [H]:

R load [Ohm]:

C load [F]:

OK Cancel Help Apply

Figura 3.16: Maschera del blocco CoilMagnet

Come si nota dalla figura il blocco presenta una maschera molto ampia nel quale é possibile inserire molti parametri. L'analisi della maschera cosí come l'analisi del blocco interno puó essere suddivisa in due parti:

- Una prima parte prevede l'accoppiamento del mondo elettrico e del mondo meccanico, con la lettura della mappa del flusso e l'inserimento dei dati geometrici che permettono il calcolo di alcuni parametri elettrici quali resistenza avvolgimento e numero di spire.
- La seconda parte prevede l'inserimento dei parametri che costituiranno la parte di potenza che viene collegata al energy harvester.

Analizzando la prima parte, si nota che la lettura della mappa avviene tramite un file di testo (.txt). Questo file viene appositamente scritto in modo automatico grazie a uno script di Matlab. Questo script permette di leggere alcuni risultati che derivano dall'esecuzione di DualLab e inserirli in questo file. L'organizzazione dei dati avviene per colonne sia in fase di input che di output come si vede in figura 3.17. In input nelle quattro colonne ci saranno:

- Colonna 1: Posizione ϑ ;
- Colonna 2: Forza elastica F_z ;
- Colonna 3: Flusso φ_1 ;
- Colonna 4: Flusso φ_2 ;

Nel nostro caso le colonne 2 e 4 saranno colonne di zeri in quanto non ci saranno forze elastiche e il flusso é unico. In Output, dopo l'elaborazione dello script che compone le mappe si otterranno dei risultati suddivisi nel seguente modo:

- Colonna 1: Posizione ϑ ;
- Colonna 2: Forza elastica F_z ;
- Colonna 3: Flusso φ_1 ;
- Colonna 4: Flusso φ_2 ;
- Colonna 5: Derivata del flusso rispetto alla posizione $\frac{d\varphi_1}{d\vartheta}$;
- Colonna 6: Derivata del flusso rispetto alla posizione $\frac{d\varphi_2}{d\vartheta}$;

```
function F_map = CoilMagnet_Axial(fname,graph)
%COILMAGNET_Axial
%   Read FEMM output (.txt file) and create magnetic maps for simulink
%   F_map = CoilMagnet_Axial(fname)
%   F_map = CoilMagnet_Axial

%-----
%INPUT
%Mag.pos      Force      Flux
%theta        Fz          Phi1      Phi2
%[rad]        [N]         [Wb]       [Wb]
%-----
%OUTPUT
%Mag.pos      Force      Flux      Flux variation
%theta        Fz          Phi1      Phi2      dPhi1/dtheta dPhi2/dtheta
%[rad]        [N]         [Wb]       [Wb]       [Wb/rad]    [Wb/rad]
%-----
```

Figura 3.17: Script per la costruzione delle mappe

Anche questa volta alcune colonne (1,2,4,6) saranno zero. La seconda parte della maschera prevede l'inserimento dei dati relativi al circuito elettrico di potenza. Sono previste varie configurazioni che possono essere selezionate tramite il selettore. Le varie configurazioni, così come la lettura della mappa e il calcolo delle spire e della resistenza totale vengono inizializzata nell'editor della maschera.

```

IniBlock

eval(['[F_map]=CoilMagnet_Axial(''',file_map,''',0);'])

sx = 1e-6*pi*d_wire^2/4;
N1 = fix((dim_coil(1,1)/d_wire)*(dim_coil(1,2)/d_wire));
R = N1*n_pol*dim_coil(1,3)*1e-3/(sigma*sx) + Radd;
N2=0;

if Adapt==1
    Rl = R;
    if R_RLC==1
        L = 0;
        Cl = 0;
    else
        %L = 0.9843e-9*((N1+N2)^2*d_coil)/(0.45+(dim_coil(1,2)+dim_coil(1,3))/d_coil);
        LM1 = load('CoilMagnet_Inductance1.txt','-ascii');
        LM2 = load('CoilMagnet_Inductance2.txt','-ascii');
        L = N1^2*LM1(1,1)+N2^2*LM2(1,1)+N1*N2*(LM1(1,2)+LM2(1,2));
        Cl = 0;
    end
else
    L = Lsim;
    Rl = Rsim;
    Cl = Csim;
end
    
```

Caricamento mappa

Calcolo N ed R

Selettore per le varie configurazioni circuitali

Figura 3.18: Inizializzazione blocco CoilMagnet

Dalla figura, nel rettangolo rosso si possono leggere le righe di comando che calcolano la resistenza totale dell'avvolgimento dell'harvester e il numero di spire. Entrambi verranno calcolati allo stesso modo in cui sono stati calcolati nel Capitolo 2 (figura 2.4). Con questa schematizzazione il numero di spire é:

$$N = \frac{dr}{D_{wire}} \cdot \frac{h}{D_{wire}} \quad (3.14)$$

dove in riferimento ai nomi dati in figura 2.4:

- N: corrisponde a N_{turn} ;
- dr: corrisponde a $\frac{R_{coil}}{2}$ lunghezza base dell'avvolgimento;
- D_{wire} : é il diametro di un filo di rame;
- h: corrisponde a Z_{coil} altezza dell'avvolgimento.

Nel codice per approssimare a un numero intero viene usato il comando fix che a differenza di double int32 usato in Matlab ci

Anche questa volta é possibile suddividere lo studio interno del blocco in vari parti. La suddivisione consiste sostanzialmente in due parti in cascata, dove gli output di una parte sono gli input dell'altra.

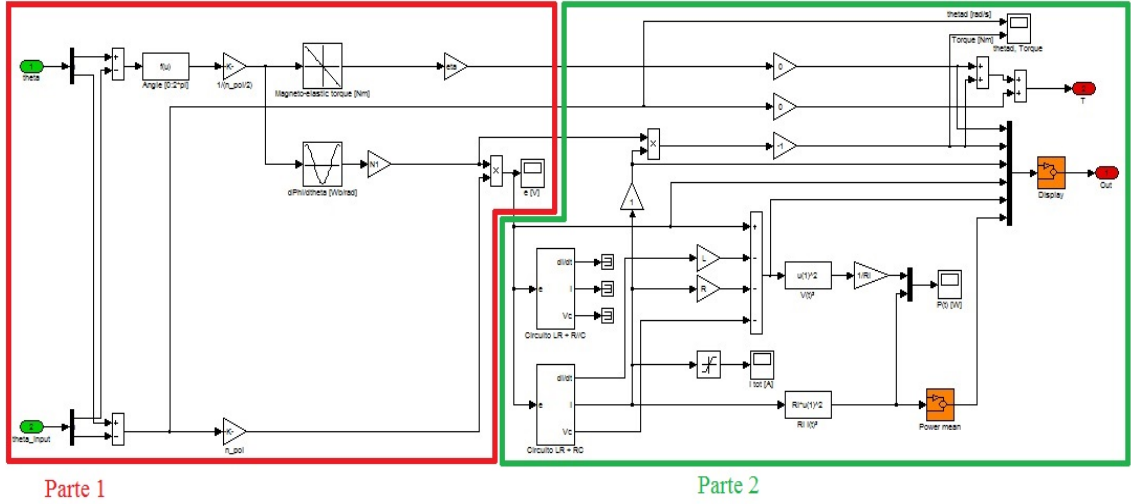


Figura 3.20: Suddivisione interna blocco CoilMagnet

La Parte 1 (riquadro rosso) é la parte che si occupa del calcolo della forza elettromotrice del sistema. Essa riceve come input gli output del blocco Input e del blocco Pendulum. Entrambe al loro interno contengono due variabili di posizione e velocità angolare. Appena ricevuti questi ingressi, essi vengono processati in due blocchi differenza, in modo da ottenere un canale in alto con una differenza di posizione angolare e un canale in basso con una differenza di velocità angolare. La differenza di posizione angolare viene processata in blocchi in cui si riporta la sua differenza in un intervallo di angolo tra $[0; 2\pi]$ e successivamente divisa per riportata tramite una divisione in un intervallo di angolo tra $[0; 0,89\text{rad}]$, intervallo su cui é stato calcolato il flusso. Questo intervallo é ottenuto perché in DualLab il calcolo del flusso in funzione di theta ($\varphi(\theta)$) é calcolato facendo l'integrale del potenziale vettore calcolato con step di angolo $d\beta$, dove β corrisponde a per un intervallo di angolo (variabile `ang`) che va da

$[0; 2\pi]$, dove $\tau = \frac{2\pi}{N_{pol}} = 0.445$. Questa informazione di posizione angolare entra poi in due blocchi 'Lookup Table' dove il primo ci permette di leggere e interpolare dalle mappe costruite precedentemente i valori di coppia magneto - elastica (nulla nel modello in esame), mentre il secondo ci permette di ottenere i valori di flusso che moltiplicati per il numero di spire restituiranno il flusso concatenato. Moltiplicando questo per la differenza di velocità e per il numero dei poli si otterrà la f.e.m. La seconda parte (riquadro verde) come detto in precedenza riceve in input gli output della prima parte. Quindi si avrà un sistema che in ingresso ha f.e.m, coppia magneto - elastica e $\frac{d\lambda}{d\theta}$. L'ingresso f.e.m viene processato attraverso i blocchi per le varie configurazioni circuitali per il calcolo della corrente e successivamente della potenza. Possiamo distinguere:

- Circuito RL o R//C

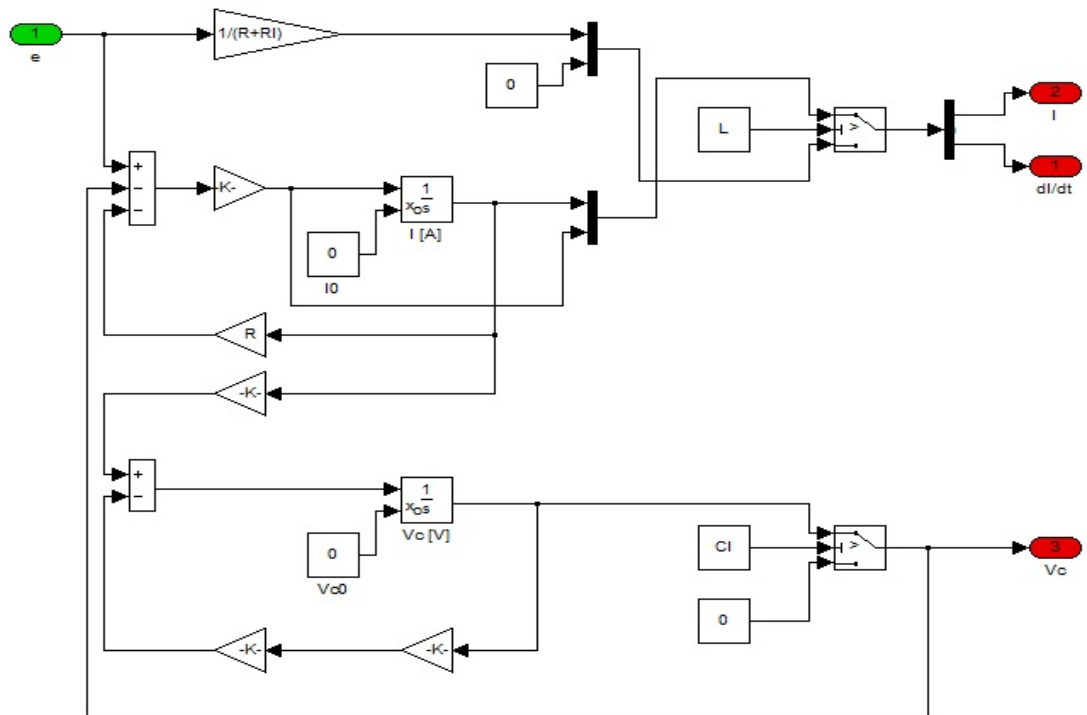


Figura 3.21: Blocco circuitale RL+R//RC

- Circuito RL o RC

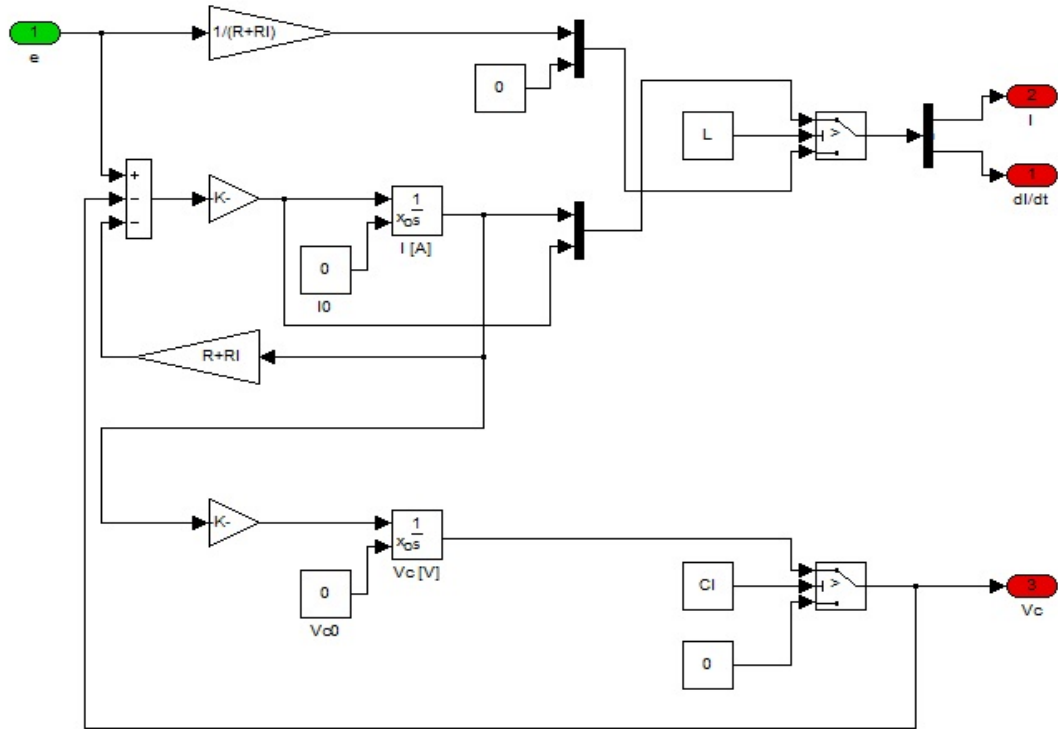


Figura 3.22: Blocco circuitale RL+RC

In entrambi i casi si esce da questi blocchi con 3 variabili ($\frac{di}{dt}$, i , V_c). L'ingresso $\frac{d\lambda}{d\theta}$ viene usato per il calcolo della coppia meccanica. Infatti viene applicata l'equazione (3.8) che restituisce la coppia meccanica che viene stampata insieme alla differenza di velocità angolare. Nel caso in esame, il energy harvester si troverà a funzionare con un carico puramente resistivo in condizioni di adattamento. Gli schemi circuitali presentati sono possibili altri scenari di funzionamento. L'uso della configurazione con carico puramente resistivo in condizioni di adattamento permetterà di ritrovare alcuni valori già trovati nei calcoli in DualLab.

Capitolo 4

Progettazione pendolo

4.1 Analisi della geometria del pendolo

La modellizzazione del sistema funzionante con carico resistivo in condizione di adattamento elettrico, permette di affermare che l'energy harvester deve raccogliere una potenza massima di 0,56 W, risultato ottenuto durante la progettazione elettrica. L'accoppiamento elettro - meccanico come spiegato in precedenza si realizza facendo in modo che la potenza elettrica sia uguale alla potenza meccanica. Per questo motivo le caratteristiche del pendolo dipendono dal tipo di applicazione e dalla potenza che si vuole raccogliere. Per trovare la perfetta configurazione del pendolo bisogna fare l'analisi della sua geometria, prendendo come riferimento il pendolo pensato in partenza. Da una prima analisi a vista d'occhio esso non deve essere leggero, deve avere un baricentro distante il piú possibile dall'origine e con un momento d'inerzia abbastanza grande. Sapendo che i parametri di interesse (massa, distanza origine - centro di massa, momento d'inerzia baricentrico) dipendono linearmente dallo spessore (imposto un angolo θ a cui si vuole tenere il pendolo per produrre la potenza desiderata), si va a cercare un modello ottimale che restituisce i parametri da usare nel modello Simulink per ottenere i valori di potenza calcolati in DualLab. La prima cosa che viene in mente

di fare é quella di creare un pendolo di materiale leggero che abbia al suo interno una parte di materiale pesante che porti il baricentro della struttura il piú lontano possibile dal centro di rotazione. Si costruisce quindi una struttura fatta in ABS e si appesantisce la struttura con masse cilindriche fatte in piombo. La scelta del numero dei masse in questa fase é irrilevante, ma in seguito viene studiato il numero delle masse per decidere la migliore configurazione da adottare. Una buona progettazione del pendolo passa attraverso la descrizione geometrica della struttura e dal suo studio a livello analitico attraverso le equazioni che ne definiscono le dimensioni, la massa, il volume, il centro di massa e il momento d'inerzia. Il suo studio si riduce sostanzialmente alla definizione di 3 equazioni:

- Equazione della massa;
- Equazione del momento d'inerzia rispetto al centro di rotazione;
- Equazione del centro di massa.

L'analisi delle equazioni che descrivono il pendolo passa attraverso l'individuazione di quelli che sono i vincoli strutturali al quale esso é soggetto.

Questo é possibile farlo andando ad analizzare il pendolo di partenza.

Dalla figura é possibile notare quali sono le variabili che de-

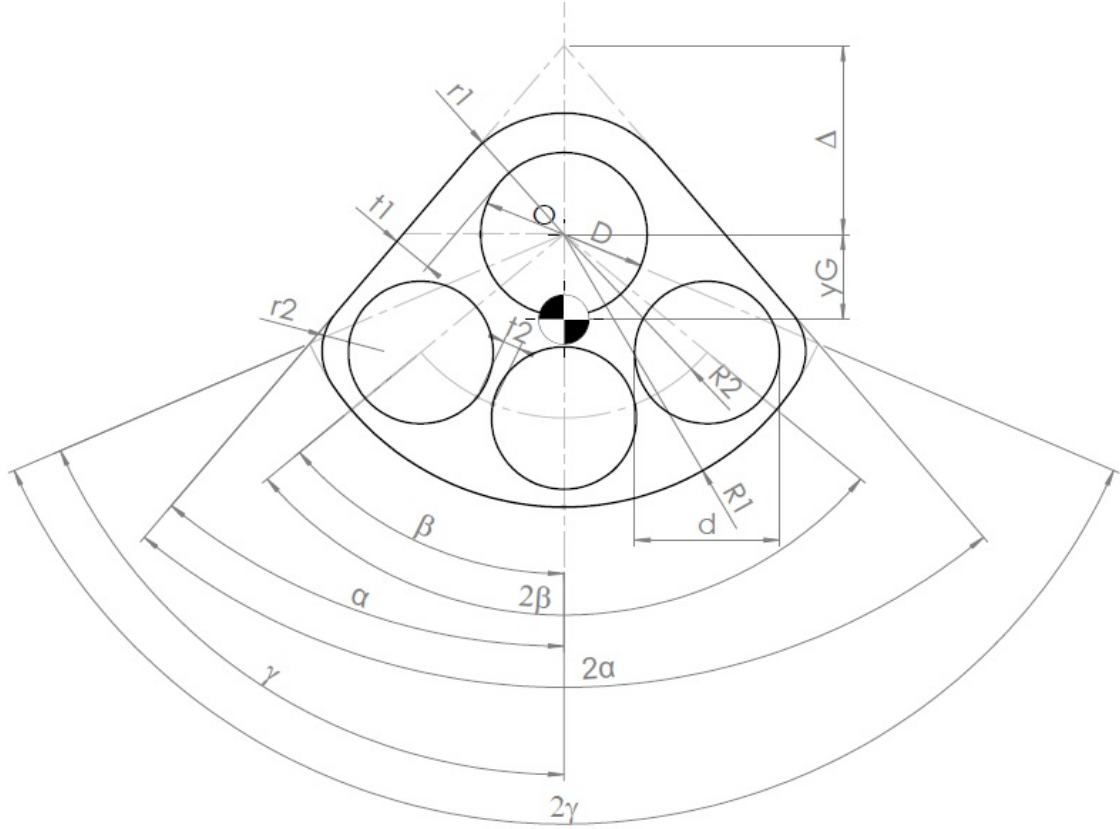


Figura 4.1: Geometria pendolo

scrivono la geometria del pendolo, aggiungendo le informazioni riguardanti i materiali e le molteplicitá. Esse sono:

- R_1 : raggio esterno del pendolo rispetto a O;
- R_2 : raggio su cui sono posti i centri dei fori rispetto a O;
- d : diametro fori per masse;
- D : diametro foro centrale;
- α : apertura circolare;
- β : distanza angolare tra i centri dei fori esterni;

- γ : angolo di apertura tra R_1 e la l'asse verticale della struttura;
- s : spessore;
- y_G : distanza centro di massa da centro di rotazione;
- Δ : distanza O - O';
- t_1 : fattore di stickness superiore;
- t_2 : fattore di stickness inferiore;
- r_1 : raccordo superiore;
- r_2 : raccordo inferiore;
- ρ_1 : densità materiale pendolo;
- ρ_2 : densità materiale riempimento fori;
- n : molteplicità fori.

Si definiscono quali sono le variabili indipendenti e le variabili dipendenti e le relazioni fra di esse.

Var. Indipendenti	Var. Dipendenti
s	β
α	R_2
R_1	Δ
t_1	d
t_2	
r_1	
r_2	
D	

Guardando la geometria del pendolo é possibile ricavare quindi le variabili dipendenti da quelle indipendenti. Si hanno quindi

cinque equazioni:

$$\Delta(D, t_1, \alpha) = \frac{\frac{D}{2} + t_1}{\sin(\alpha)} \quad (4.1)$$

L'equazione di $\gamma(\Delta, \alpha, R_1)$ sarà la soluzione di un'equazione di secondo grado nel quale verrà preso solo il valore positivo.

$$R_1 \cdot \sin(\gamma) = (\Delta + R_1 \cdot \cos(\gamma)) \cdot \tan(\alpha) \quad (4.2)$$

Per la risoluzione di questa equazione servirà una seconda equazione. Si userà l'identità trigonometrica.

$$\sin^2(\gamma) + \cos^2(\gamma) = 1 \quad (4.3)$$

Ricavando il $\sin(\gamma)$ dalla prima e sostituendola nella seconda si trova:

$$A \cos^2(\gamma) + B \cos(\gamma) + C = 0 \quad (4.4)$$

dove i coefficienti valgono:

$$A = 1 + \tan^2(\alpha) \quad (4.5)$$

$$B = \frac{2 \cdot \tan^2(\alpha) \cdot \Delta}{R_1} \quad (4.6)$$

$$C = -1 + \frac{\tan^2(\alpha) \cdot \Delta^2}{R_1^2} \quad (4.7)$$

quindi:

$$\gamma(\Delta, \alpha, R_1) = \cos^{-1} \left(\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4 \cdot A \cdot C}}{2 \cdot A} \right) \quad (4.8)$$

Definito il γ si può definire la variabile d , R_2 e l'angolo β .

$$d(n, \gamma, R_1, t_2) = \frac{(2 \cdot \gamma \cdot (R_1 - t_2) - t_2 \cdot (n + 1))}{(n + \gamma)} \quad (4.9)$$

$$R_2(R_1, d, t_2) = R_1 - \frac{d}{2} - t_2 \quad (4.10)$$

$$\beta(R_1, R_2, \gamma) = \frac{t_2 + d}{R_2} \quad (4.11)$$

Descritto il pendolo di partenza e le variabili dipendenti, si può passare alla stesura analitica delle equazioni sopra citate. Per la descrizione analitica il pendolo viene considerato come un settore circolare centrato in O' nel quale sono presenti al suo interno dei fori, tappati con materiale pesante. Cominciando dall'equazione della massa, la massa totale è la somma della massa del settore circolare privata della quantità che compongono i fori, al quale si somma la massa dei masse che riempiono i fori. In termini matematici:

$$M = M_1 + M_2 + M_3 \quad (4.12)$$

dove M_1 è la massa di un settore circolare, M_2 è la massa dei masse e M_3 è la massa che viene sottratta dal foro centrale.

Essa viene calcolata come somma algebrica di 3 componenti.

$$M_1 = M_{11} + M_{12} + M_{13} \quad (4.13)$$

Queste tre componenti rappresentano la scomposizione del settore circolare nel seguente modo:

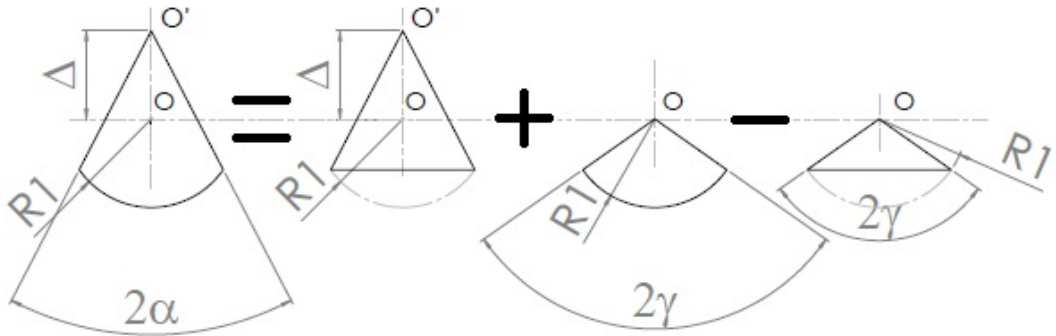


Figura 4.2: Scomposizione settore circolare rappresentante il pendolo

Il calcolo delle masse prevede il calcolo delle aree, che sono:

$$A_{11} = R_1 \cdot \sin(\gamma) \cdot (\Delta + R_1 \cdot \cos(\gamma)) \quad (4.14)$$

$$A_{12} = \gamma \cdot R_1^2 \quad (4.15)$$

$$A_{13} = R_1^2 \cdot \sin(\gamma) \cdot \cos(\gamma) \quad (4.16)$$

La somma delle delle 3 componenti restituisce l'area A_1

$$A_1 = A_{11} + A_{12} - A_{13} \quad (4.17)$$

dove l'area A_1 rappresenta l'area del settore circolare. Trovate le aree, il calcolo della massa é una semplice moltiplicazione per $\rho_1 \cdot s$

$$M_1 = \rho_1 \cdot s \cdot A_1 \quad (4.18)$$

Per il calcolo di M_2 si deve tenere conto del fatto che l'area riempita di materiale pesante é area che viene sottratta dal settore circolare di materiale leggero.

$$M_2 = (\rho_2 - \rho_1) \cdot s \cdot A_2 \quad (4.19)$$

con A_2 che identifica l'area degli n fori dei masse

$$A_2 = n \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \quad (4.20)$$

La massa M_3 rappresenta la massa di materiale leggero del foro centrato in O sottratta.

$$M_3 = \rho_1 \cdot s \cdot A_3 \quad (4.21)$$

con

$$A_3 = -\pi \cdot \frac{D^2}{4} \quad (4.22)$$

il segno meno identifica appunto che questa area é sottratta al settore circolare.

Ottenute le masse si possono calcolare i momenti statici riferiti al centro O. Anche i momenti statici si calcoleranno rispetto a tre componenti: pendolo, pesi e foro in O. Per quanto riguarda il momento statico del pendolo, si usa sempre il modello del settore circolare di figura 4.2. Il momento statico S_{x1} ha tre componenti a sua volta.

$$S_{x11} = -M_{11} \cdot \left(\frac{2}{3} \cdot (\Delta + R_1 \cdot \cos(\gamma)) - \Delta \right) \quad (4.23)$$

$$S_{x12} = -2 \cdot \rho_1 \cdot s \cdot \sin(\gamma) \cdot \frac{R_1^3}{3} \quad (4.24)$$

$$S_{x13} = -\text{sign}(A_{13}) \cdot M_{13} \cdot \frac{2}{3} \cdot R_1 \cdot \cos(\gamma) \quad (4.25)$$

S_{x1} é dato dalla somma algebrica delle 3 componenti.

$$S_{x1} = S_{x11} + S_{x12} - (\text{sign}(A_{13}) \cdot S_{x13}) \quad (4.26)$$

dove la componente S_{x13} dipende dal segno della sua area che per angoli $\gamma > 90^\circ$ deve cambiare di segno.

Per capire meglio questa relazione si può osservare la seguente immagine.

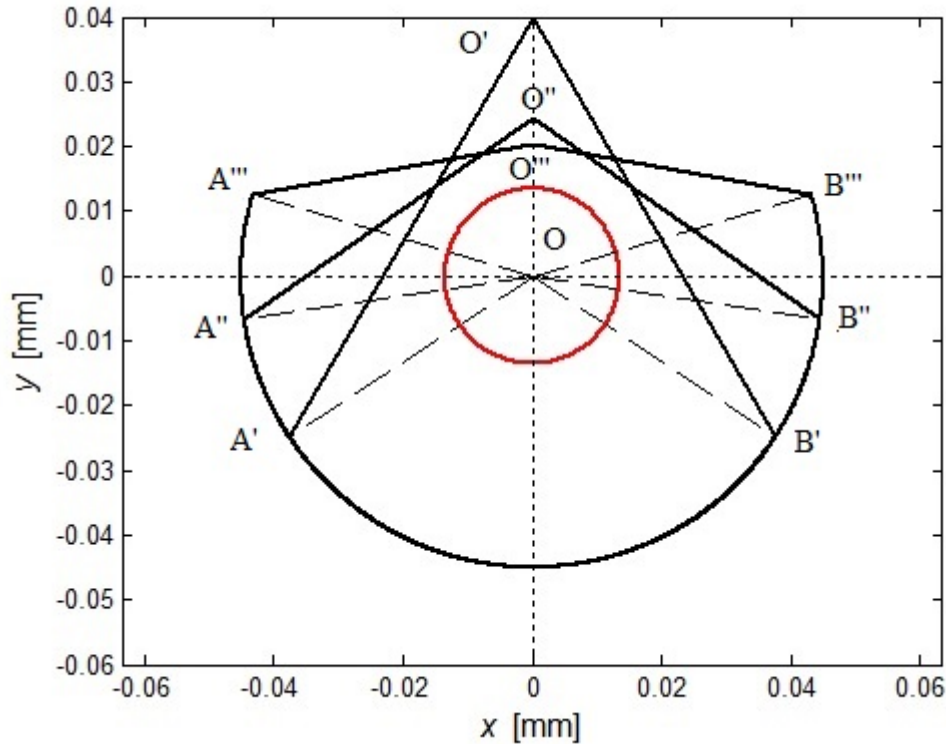


Figura 4.3: Variazione della struttura pendolo al variare di α

Nell'immagine si mostra la configurazione del pendolo per 3 diversi angoli α (30° , 55° , 80°). Analizzando la scomposizione in triangoli e settori circolari fatta come in figura 4.2, si ottengono 3 strutture:

- Pendolo O' - A' - B'

La prima configurazione é formata dal triangolo O' - A' - B', il settore circolare O - A' - B' e il triangolo O - A' - B'. Sommando il primo triangolo con il settore circolare e sottraendo il triangolo O - A' - B' si ottiene la struttura pendolo per il primo angolo analizzato.

- Pendolo O'' - A'' - B''

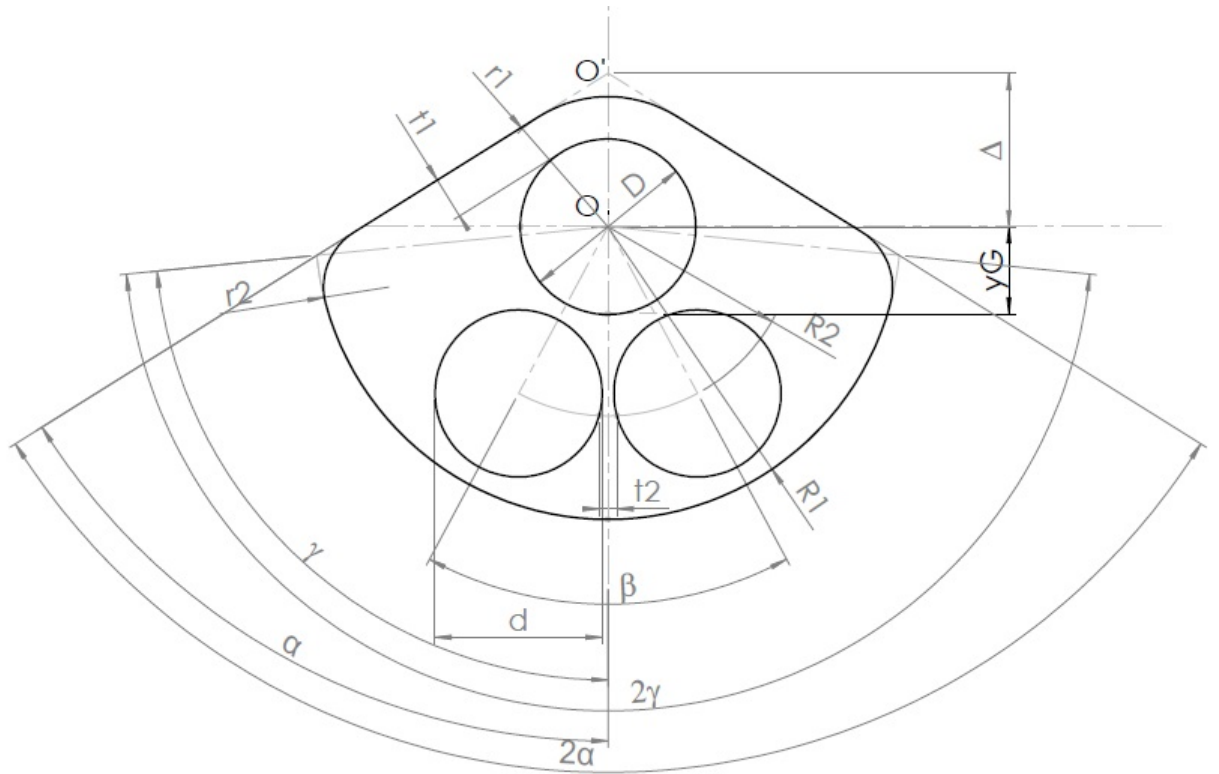
La seconda configurazione é formata dal triangolo O'' - A'' - B'', il settore circolare O - A'' - B'' e il triangolo O - A'' - B''. Sommando il primo triangolo con il settore circolare e

sottraendo il triangolo $O - A'' - B''$ si ottiene la struttura pendolo per il secondo angolo analizzato.

- Pendolo $O''' - A''' - B'''$

La terza configurazione é formata dal triangolo $O''' - A''' - B'''$, il settore circolare $O - A''' - B'''$ e il triangolo $O - A''' - B'''$. In questa configurazione le cose però risultano essere cambiate rispetto alle precedenti, infatti per ottenere la struttura pendolo si dovrà sommare il primo triangolo con il settore circolare e sommare (non sottrarre) il triangolo $O - A''' - B'''$ in quanto l'area del triangolo ha il segno cambiato. Questo giustifica la funzione segno introdotta nel calcolo del momento.

Il calcolo dei momenti statici dei pesi viene a dipendere dal numero di pesi che si intende inserire. É questo fattore infatti a influire tantissimo sui risultati finali in termini di distanza del centro di massa dal centro di rotazione O , massa e momento di inerzia. Oltre al numero dei masse influisce molto sul calcolo del momento Sx_2 il modo in cui viene considerato l'angolo β .



$$S_{x2} = -(\rho_2 - \rho_1) \cdot s \cdot \left(\left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \cdot R_2 \cdot \cos\left(\frac{\beta}{2}\right) \right) \quad (4.27)$$

- 3 masse

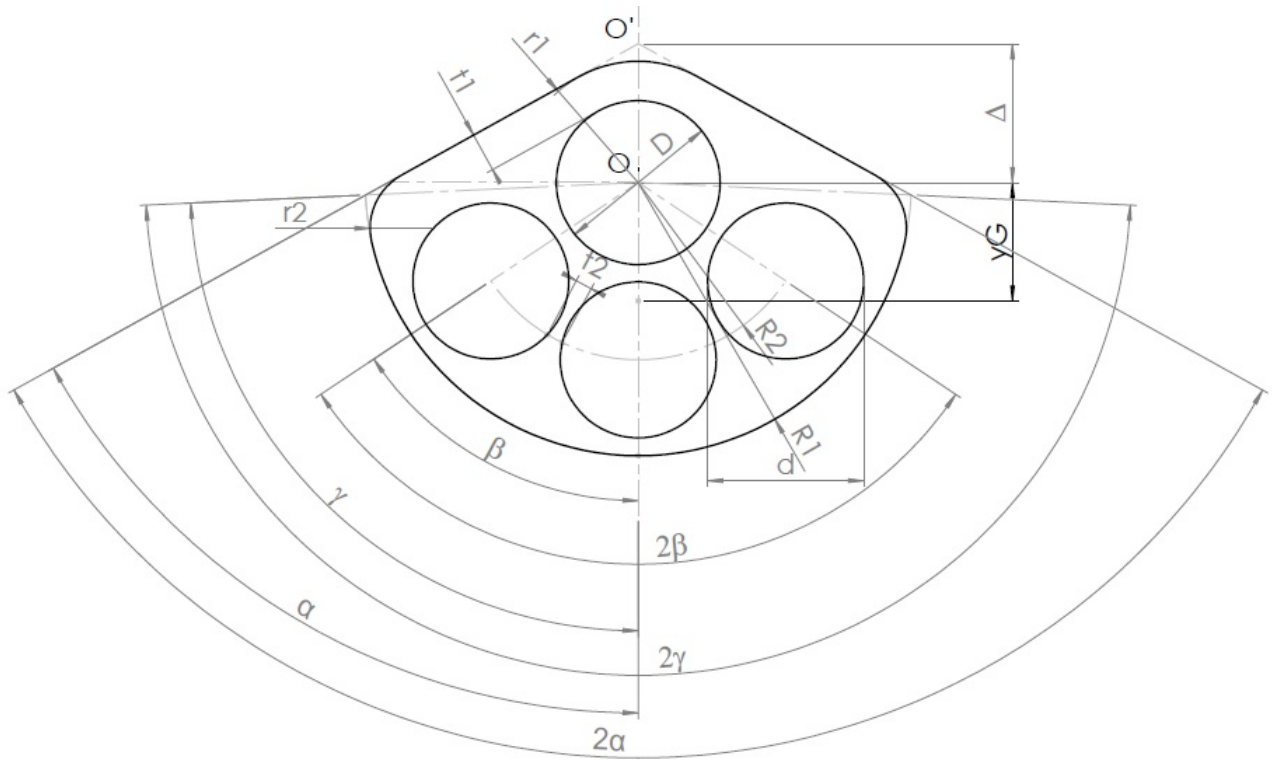


Figura 4.5: Pendolo a 3 masse

$$S_{x2} = -(\rho_2 - \rho_1) \cdot s \cdot \left(\left(\pi \frac{d^2}{4} \right) \cdot R_2 \cdot \left(1 + (n - 1) \cdot \cos(\beta) \right) \right) \quad (4.28)$$

- 4 masse

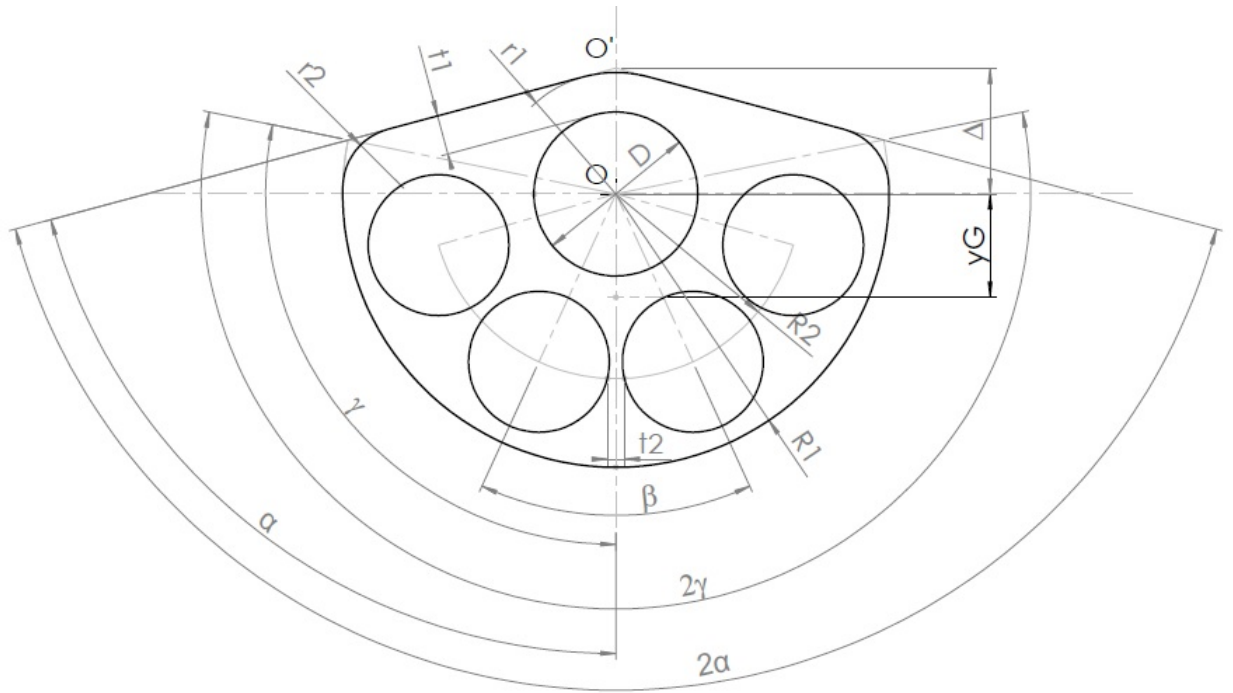


Figura 4.6: Pendolo a 4 masse

$$S_{x2} = -(\rho_2 - \rho_1)s\left(\left(\pi\frac{d^2}{4}\right)R_2\left((n-2)\cos\left(\frac{\beta}{2}\right) + (n-2)\cos\left(\frac{3}{2}\beta\right)\right)\right) \quad (4.29)$$

- 5 masse

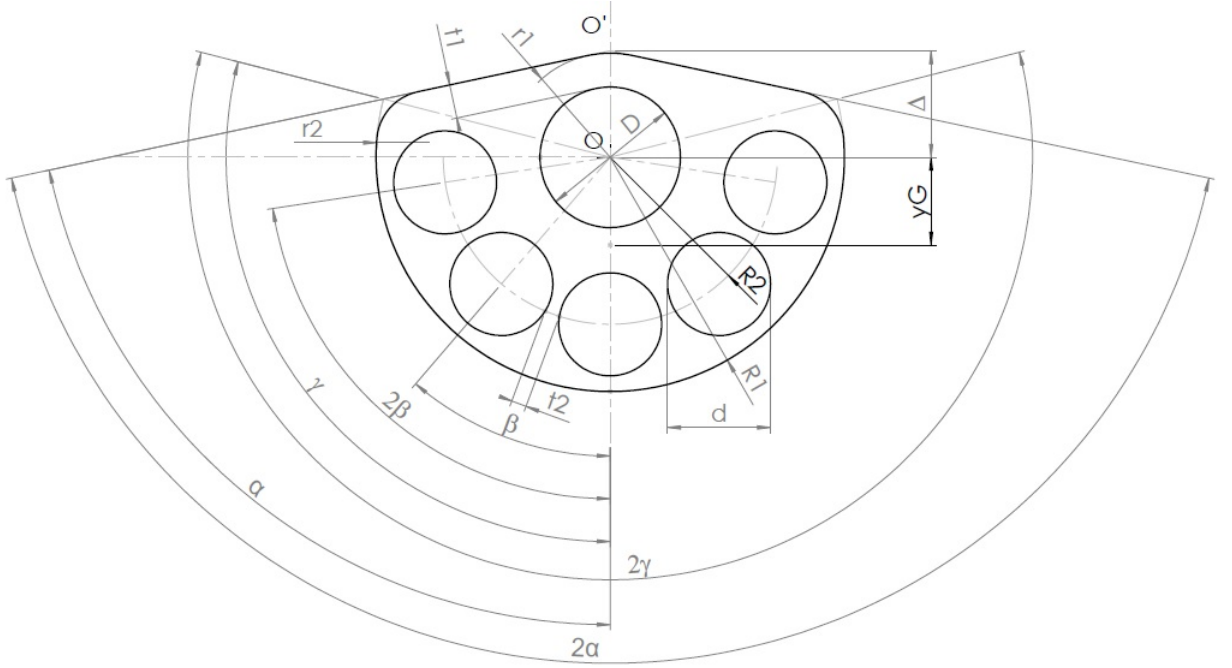


Figura 4.7: Pendolo a 5 masse

$$S_{x2} = -(\rho_2 - \rho_1)s \left(\left(\pi \frac{d^2}{4} \right) R_2 \left(1 + (n-3)\cos(\beta) + (n-3)\cos(2\beta) \right) \right) \quad (4.30)$$

Il momento statico del foro risulta essere nullo in quanto calcolato nel suo centro di massa.

$$S_{x3} = 0 \quad (4.31)$$

Il momento statico totale é quindi:

$$S_x = S_{x1} + S_{x2} + S_{x3} \quad (4.32)$$

Infine non rimane che calcolare la distanza tra il centro di massa e il centro di rotazione.

$$l_1 = \frac{S_{x1}}{M_1 + M_3} \quad (4.33)$$

$$l_2 = \frac{S_{x2}}{M_2} \quad (4.34)$$

$$y_G = \frac{S_x}{M} \quad (4.35)$$

Per quanto riguarda l'equazione del momento d'inerzia, anche esso é fatto sommando piú elementi.

$$I_O = I_{O,1} + I_{O,2} - I_{O,3} \quad (4.36)$$

dove:

- $I_{O,1}$ é il momento d'inerzia del pendolo;
- $I_{O,2}$ é il momento d'inerzia dei pesi che riempiono gli n fori;
- $I_{O,3}$ é il momento d'inerzia del foro centrale centrato in O.

Per quanto riguarda il pendolo, anche stavolta si ricorre all'approssimazione di un settore circolare, scomponendolo secondo figura 4.2.

$$I_{O,1} = I_{O,11} + I_{O,12} - (\text{sign}(A_{13}) \cdot I_{O,13}) \quad (4.37)$$

Anche nei momenti d'inerzia come nei momenti statici, la componente 13 dipende dal segno dell'area.

Procedendo al calcolo delle singole componenti di momento d'inerzia per la struttura pendolo, si definisce:

$$I_{O,12} = \rho_1 \cdot s \cdot \gamma \cdot \frac{R_1^4}{2} \quad (4.38)$$

$$I_{O,13} = \rho_1 s \left[\frac{(2R_1 \sin \gamma)(R_1 \cos(\gamma))^3}{4} + \frac{(2R_1 \sin \gamma)^3 (R_1 \cos(\gamma))}{48} \right] \quad (4.39)$$

Il momento d'inerzia $I_{O,11}$ é calcolato tramite l'uso del teorema di Huygens.

$$I_{O,11} = I_{G,1} + M_{11} \cdot (\delta - \Delta)^2 \quad (4.40)$$

indicando con δ la distanza tra il vertice del triangolo e il baricentro del triangolo e con Δ la distanza tra il vertice e il punto di

rotazione O. $I_{G,1}$ viene così calcolato:

$$I_{G,1} = \rho_1 s \left[\frac{(2R_1 \sin \gamma)(\Delta + R_1 \cos(\gamma))^3}{36} + \frac{(2R_1 \sin \gamma)^3(\Delta + R_1 \cos(\gamma))}{48} \right] \quad (4.41)$$

Per quanto riguarda il contributo dei pesi, il loro momento d'inerzia può essere calcolato con la suddivisione in momento d'inerzia nel centro di massa più il momento d'inerzia di trasporto.

$$I_{O,2} = (\rho_2 - \rho_1) \cdot n \cdot s \cdot \pi \cdot \left(\frac{d^4}{32} + \frac{d^2}{4} \cdot R_2^2 \right) \quad (4.42)$$

Infine calcoliamo il momento d'inerzia in O del foro centrato in O.

$$I_{O,3} = -\rho_1 \cdot s \cdot \pi \cdot \frac{D^4}{32} \quad (4.43)$$

Il momento d'inerzia baricentrico di tutta la struttura risulta essere:

$$I_G = I_O - (M \cdot y_G^2) \quad (4.44)$$

4.2 Progettazione pendolo nelle varie configurazioni

Una volta deciso che il pendolo deve essere un oggetto leggero che viene appesantito con delle masse di materiale pesante come il piombo, si passa all'imposizione dei valori costanti:

- $\rho_1 = 1020 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, densità della plastica;
- $\rho_2 = 11000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$, densità del piombo;
- $s = 7 \text{ [mm]}$;
- $D = 27 \text{ [mm]}$;
- $R_1 = 45 \text{ [mm]}$;
- $t_1 = 20 - \frac{D}{2} \text{ [mm]}$;
- $t_2 = 3 \text{ [mm]}$;

Si sviluppa la struttura pendolo nelle sue varie configurazioni, ovvero variando il numero di masse che devono appesantire la struttura e incrementando la massa aggiungendo plastica. Visto che lo spessore viene mantenuto costante, l'aggiunta di plastica può essere fatto solamente aumentando l'area del pendolo e quindi per rispetto dei vincoli strutturali aumentando l'angolo α . La descrizione delle varie strutture é possibile farla analizzando le variazioni dei parametri principali in funzione di α

Inserendo tutte le equazioni appena descritte in uno script Matlab é possibile ottenere le seguenti caratteristiche:

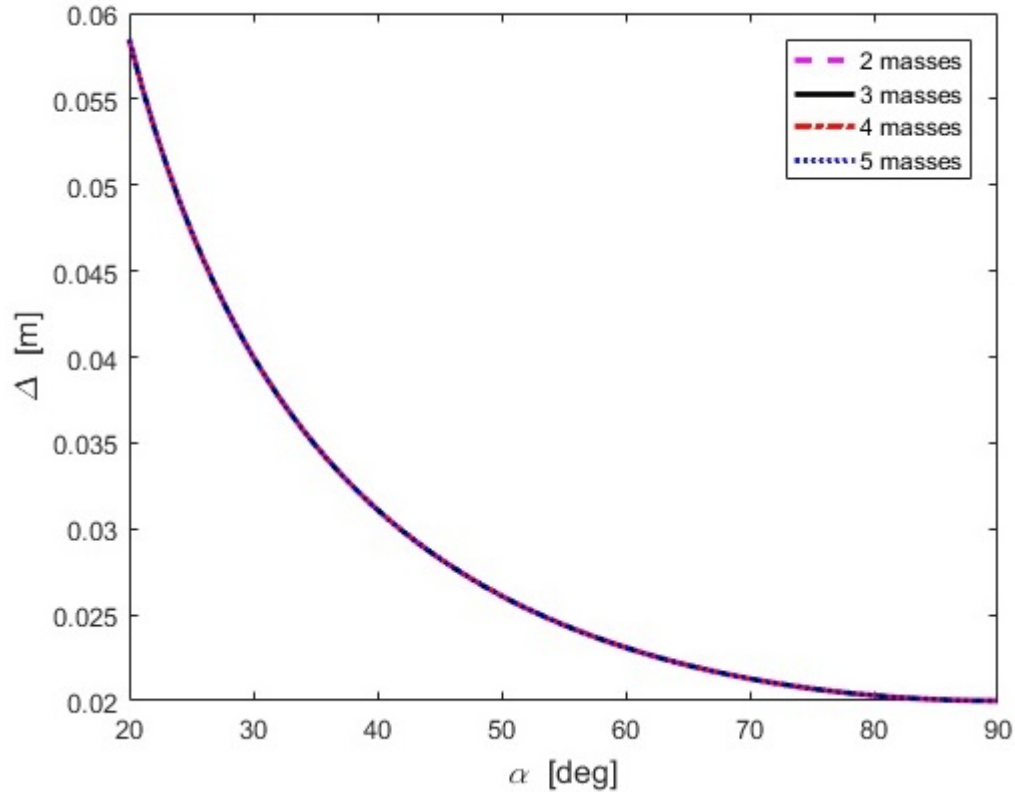
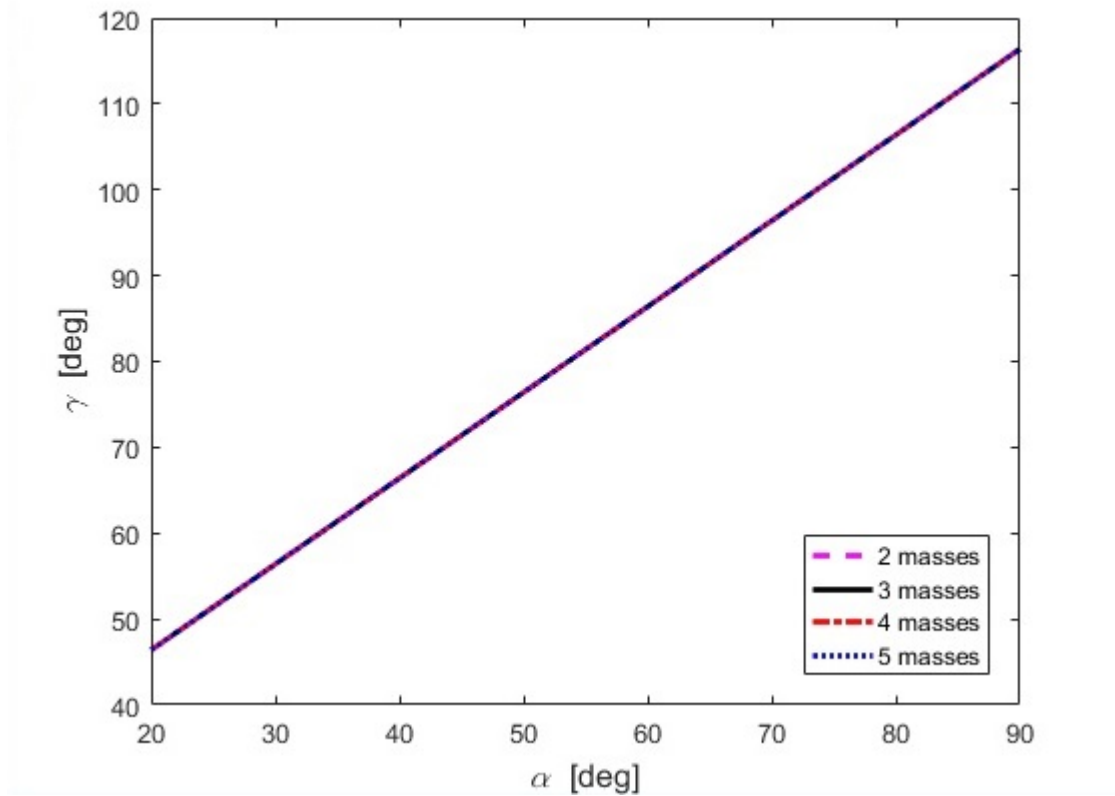


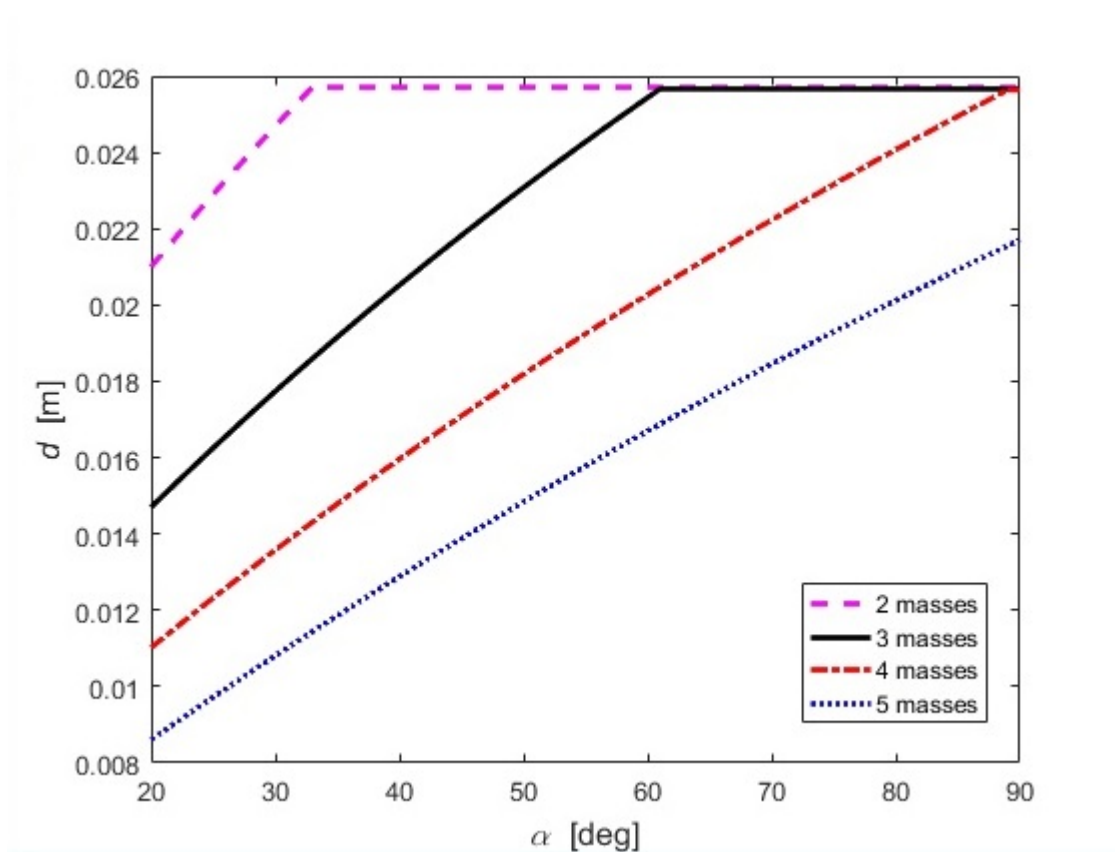
Figura 4.8: Confronto di Δ in funzione di α nelle varie configurazioni

La prima caratteristica presa in esame é quella di $\Delta(\alpha)$ ovvero la variazione della distanza tra il vertice e il centro di rotazione O in funzione dell'angolo α . Il suo andamento non é influenzato dal tipo di configurazione e la sua caratteristica risulta essere uguale in tutti i casi. Essa tende a diminuire con un andamento esponenziale negativo, fino quasi ad annullarsi.

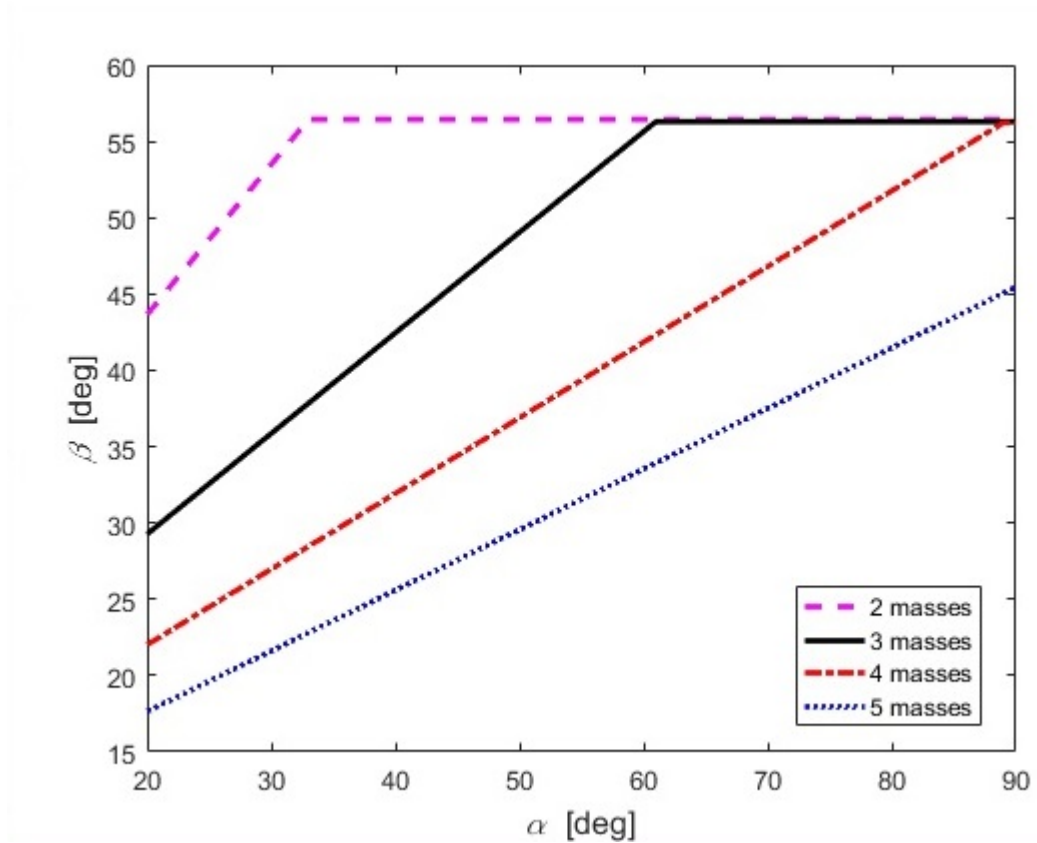
La seconda caratteristica da analizzare é quella di $\gamma(\alpha)$. Anche il suo andamento non é influenzato dal tipo di configurazione e quindi dal numero dei masse introdotti per appesantire il pendolo in plastica ed é crescente in modo lineare all'aumentare di α .


 Figura 4.9: Confronto di γ in funzione di α nelle varie configurazionii

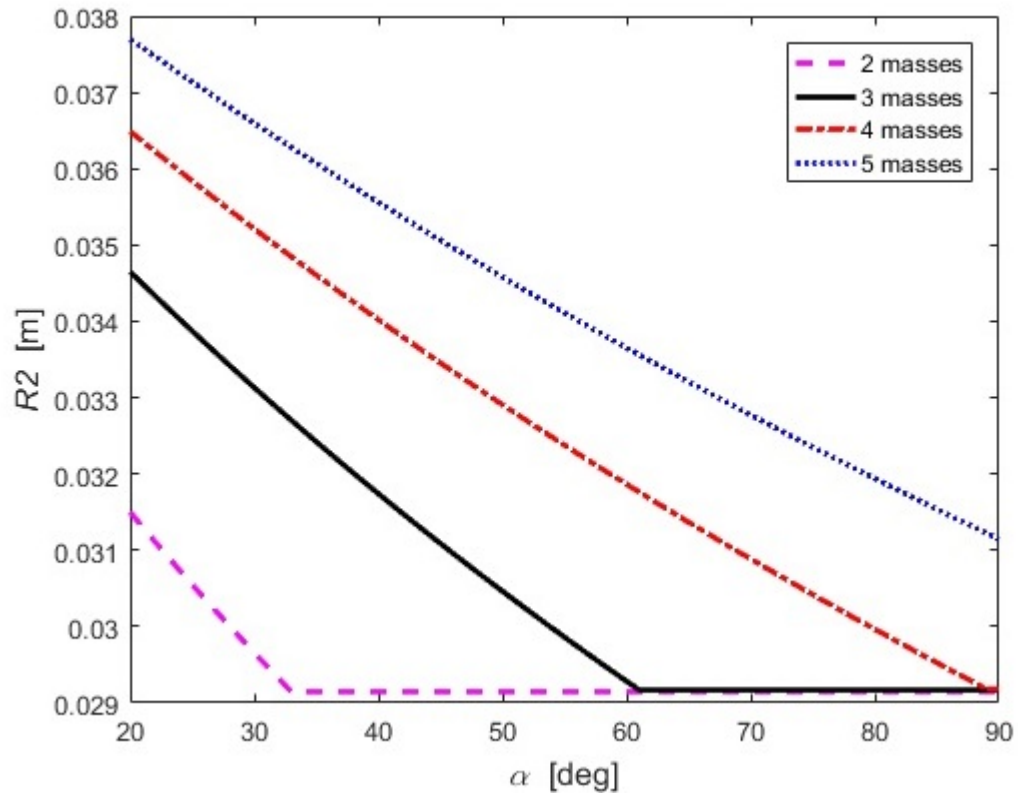
Passando ad analizzare le variazioni di $d(\alpha)$ si può notare che gli andamenti cambiano in base alla configurazione e quindi in base al numero di masse adoperati per appesantire la struttura. Dal grafico è possibile notare come il diametro delle masse adoperati cresca linearmente per tutti i casi all'inizio. Nei casi di 2 masse, 3 masse e 4 masse l'andamento di crescita viene però bloccato dai vincoli geometrici della struttura rispettivamente per angoli α pari a 35° per il caso a 2 masse, 61° per il caso a 3 masse e 89° per il caso a 4 masse. Il caso a 5 masse invece risulta avere una crescita lineare dei diametri delle masse per tutte le configurazioni di α .


 Figura 4.10: Confronto di d in funzione di α nelle varie configurazioni

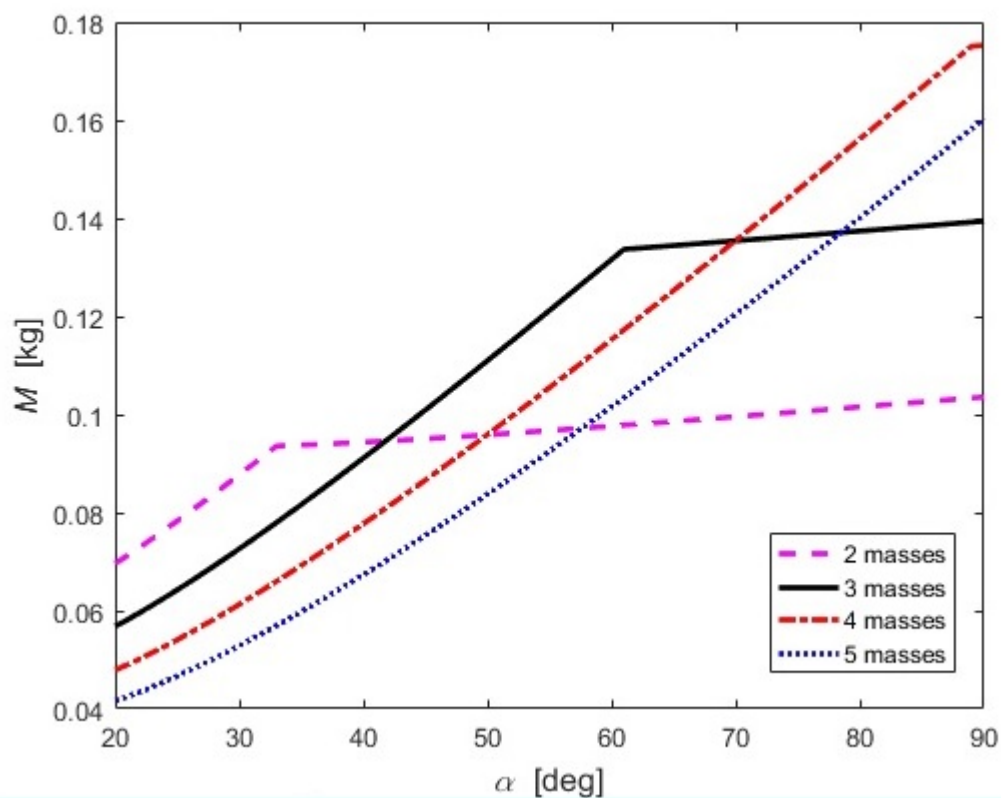
Queste masse saranno distribuite su una circonferenza di raggio R_2 e distanziati di un angolo β . Entrambe queste variabili sono funzioni di α e il loro andamento descrive in pieno la disposizione dei masse che servono per appesantire la struttura del pendolo.


 Figura 4.11: Confronto di β in funzione di α nelle varie configurazioni

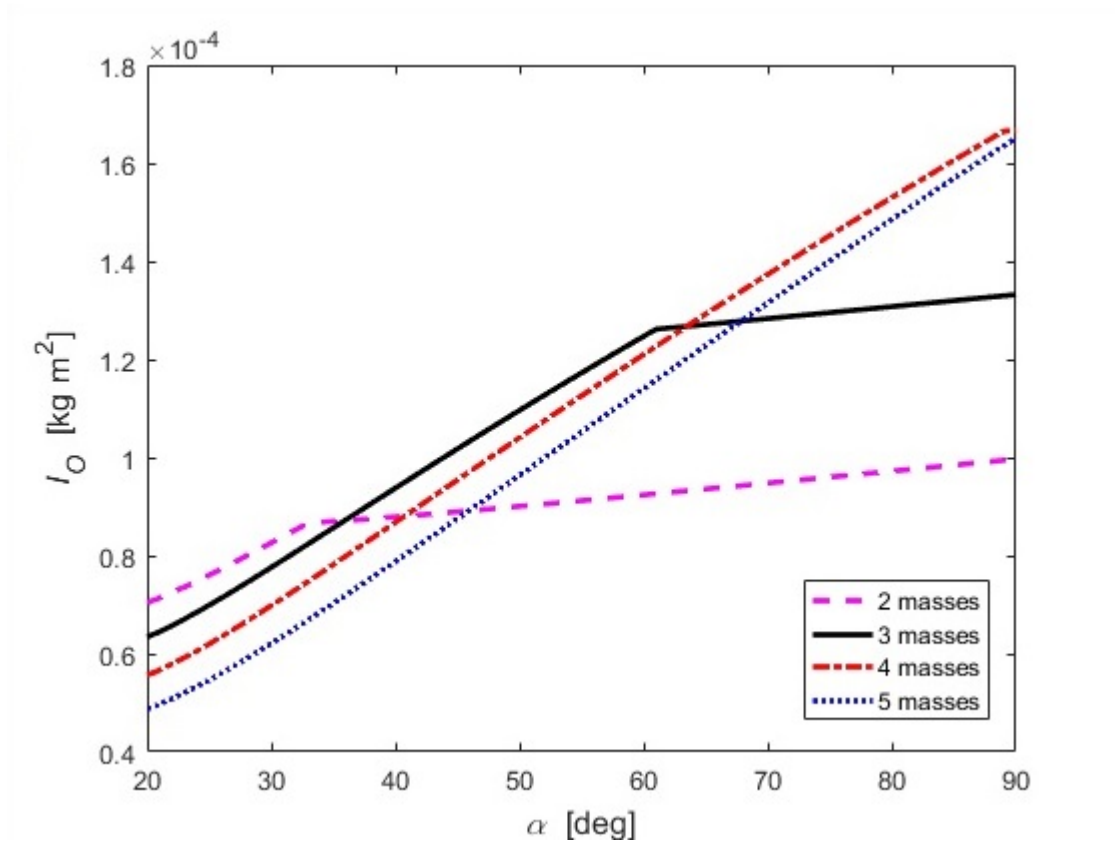
Dal grafico si nota come per la configurazione a 2,3,4 masse si arrivi a una saturazione come già preannunciato. Questo mette in luce il fatto che più le masse hanno diametro grande e meno può essere l'angolo che separa i centri di due masse. Le caratteristiche di $R_2(\alpha)$ mostrano anche loro la saturazione. R_2 nei casi 2 masse, 3 masse e 4 masse risulta bloccarsi dopo un certo angolo α . L'angolo α dove si raggiunge il raggio R_2 minimo risulta essere uguale all'angolo α a cui si blocca la crescita dei diametri delle masse. Questo influenza molto le caratteristiche di massa e baricentro.


 Figura 4.12: Confronto di R_2 in funzione di α nelle varie configurazionii

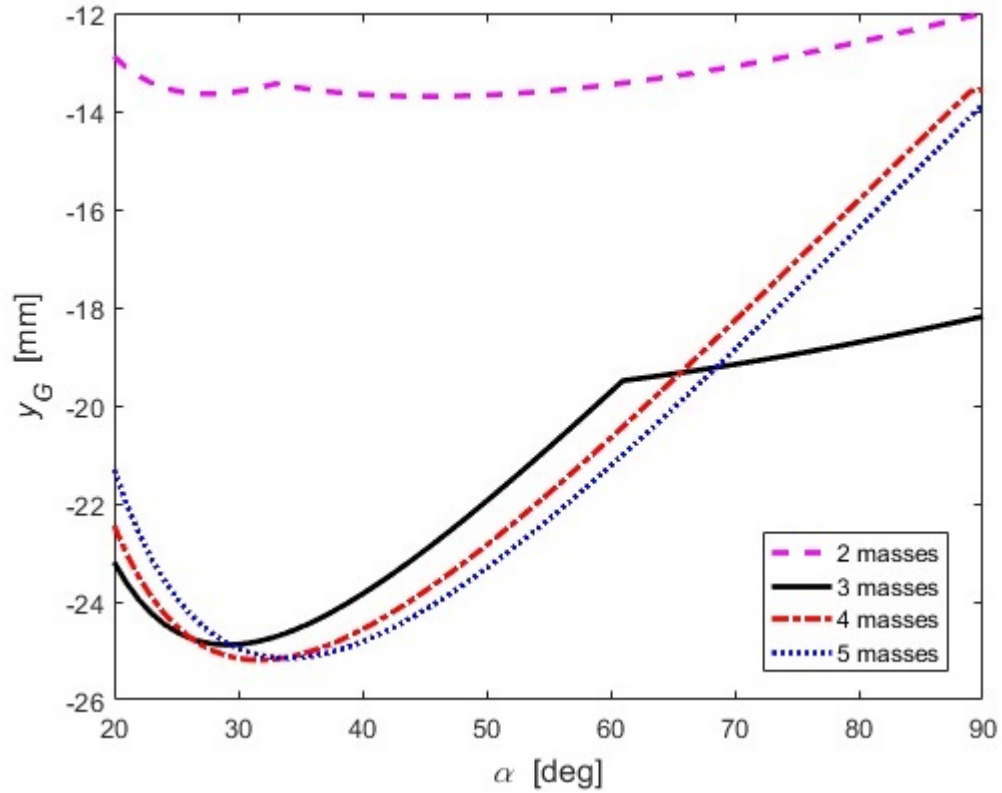
Infatti dal grafico della massa, si può notare che essa cresce fin quando non si raggiungono i limiti massimi per i diametri dei masse. Da quel momento in poi la massa continua a crescere ma con una pendenza molto ridotta, in quanto all'aumentare di α non si aggiungere più plastica e piombo, ma solo plastica. La quantità di piombo resta sempre uguale.


 Figura 4.13: Confronto di M in funzione di α nelle varie configurazionii

Un andamento simile a quello della massa si trova per i momenti di inerzia polari I_O . Essi infatti dipendono dalla massa e questo influenza la caratteristica.


 Figura 4.14: Confronto di I_O in funzione di α nelle varie configurazionii

Altro parametro che dipende dalla massa é la distanza tra il baricentro della struttura e il centro di rotazione O dipende dalla sua massa nella varie configurazioni. Il blocco della crescita dei diametri dei masse si visualizza sull'andamento di yG come un punto di discontinuit .


 Figura 4.15: Confronto di y_G in funzione di α nelle varie configurazionii

L'andamento di $y_G(\alpha)$ nel caso di due masse presenta un andamento particolare che può essere meglio analizzato andando a vedere come si comportano le componenti del momento statico nel caso a due masse. Dallo studio delle componenti del momento statico è possibile spiegare l'andamento particolare di y_G per il caso a due masse. Ricordando che la distanza y_G viene calcolata come momento statico diviso massa, si suddivide il momento statico in 3 componenti. La componente S_{x1} rappresenta il settore circolare, la S_{x12} dipende dalla disposizione delle masse e dal loro diametro e S_{13} che risulta nulla è la componente di momento statico dovuto al foro su cui verrà calettato il pendolo. Visto che la massa raggiunto il punto di discontinuità abbassa molto la sua pendenza e ha quasi un andamento costante, risulta evidente che l'andamento particolare di y_G sia dovuto al fatto che dopo aver raggiunto il massimo diametro senza violare i vincoli geometrici, la

componente due del momento statico diventa costante e il momento statico totale segue l'andamento della componente uno, ovvero quella parte di momento statico calcolata con il sistema della suddivisione della struttura pendolo in triangoli e settori circolari.

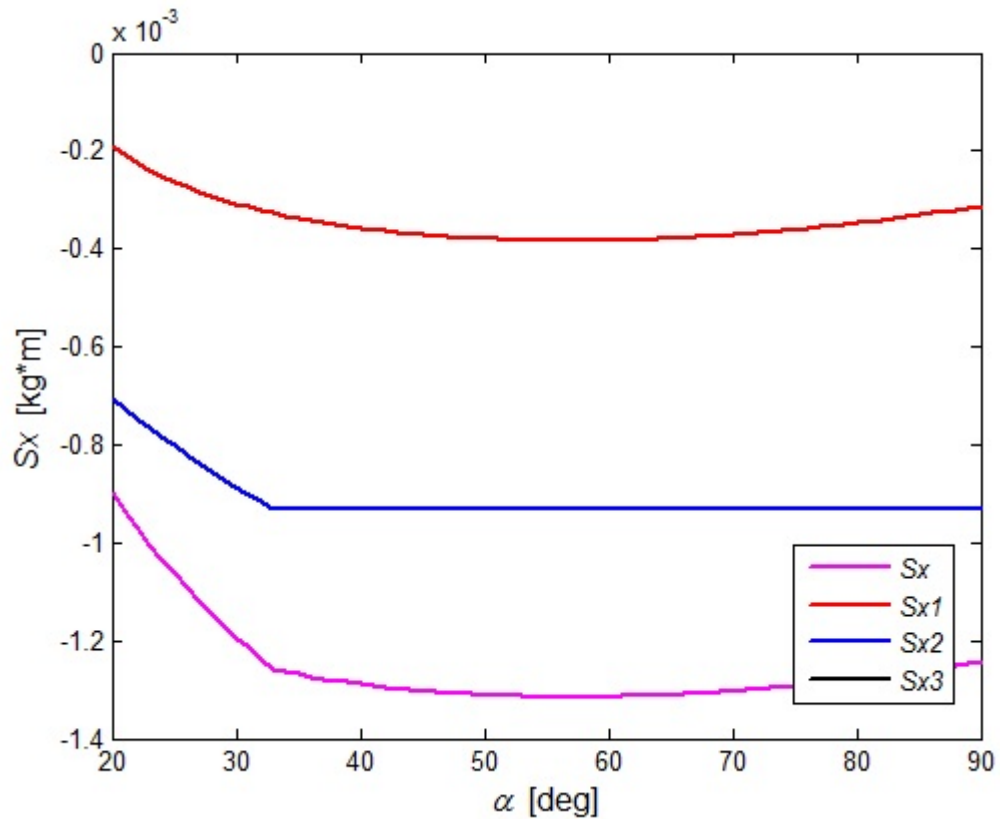


Figura 4.16: Momento statico del caso a due palle e sue componenti

Dalla figura seguente é possibile analizzare gli andamenti della componente uno del momento statico, e gli andamenti delle componenti che compongono il momento statico uno.

Gli andamenti di S_{x1} avranno segno principalmente negativo per via del fatto che alcune delle sue componenti sono al di sotto del punto O.

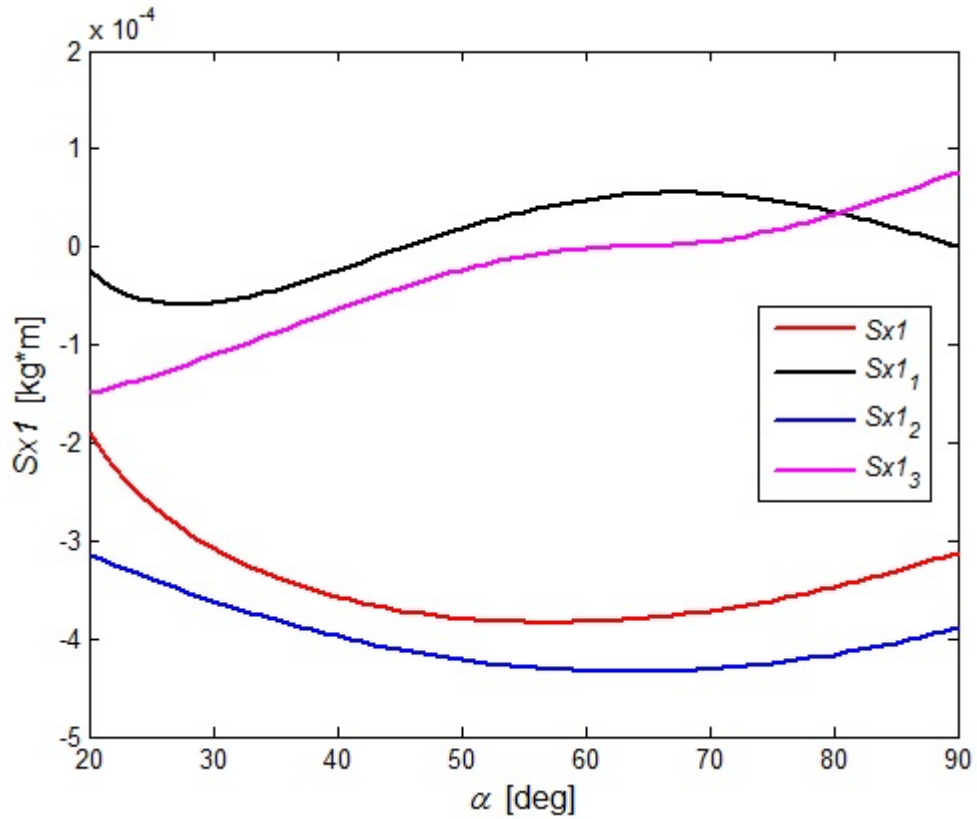


Figura 4.17: Momento statico del caso a due palle e sue componenti

La componente S_{x11} rappresenta il momento statico di un triangolo isoscele centrato in O' . Il suo andamento tende inizialmente a decrescere per via del fatto che quando α é piccolo Δ , ma con l'aumentare di α , Δ tende a diminuire e a far cambiare di segno la componente. La componente S_{x12} rappresenta il momento statico di un settore circolare. Essa ha verice in O e non O' e varia con l'angolo γ . Superato l'angolo $\gamma = 90^\circ$, si aggiunge contributo di segno opposto alla componente del momento statico. La componente S_{x13} infine, rappresenta il momento statico di un triangolo che varia con l'angolo γ . Anche questo triangolo ha vertice in O e non in O' , e per l'angolo $\gamma = 90^\circ$ il momento statico del triangolo

si annulla. Aumentando ancora l'angolo, la componente tre del momento statico cambia di segno.

A rafforzare questi concetti ci pensa il grafico delle aree della suddivisione in triangoli e settori circolari della componente S_{x1} del momento statico.

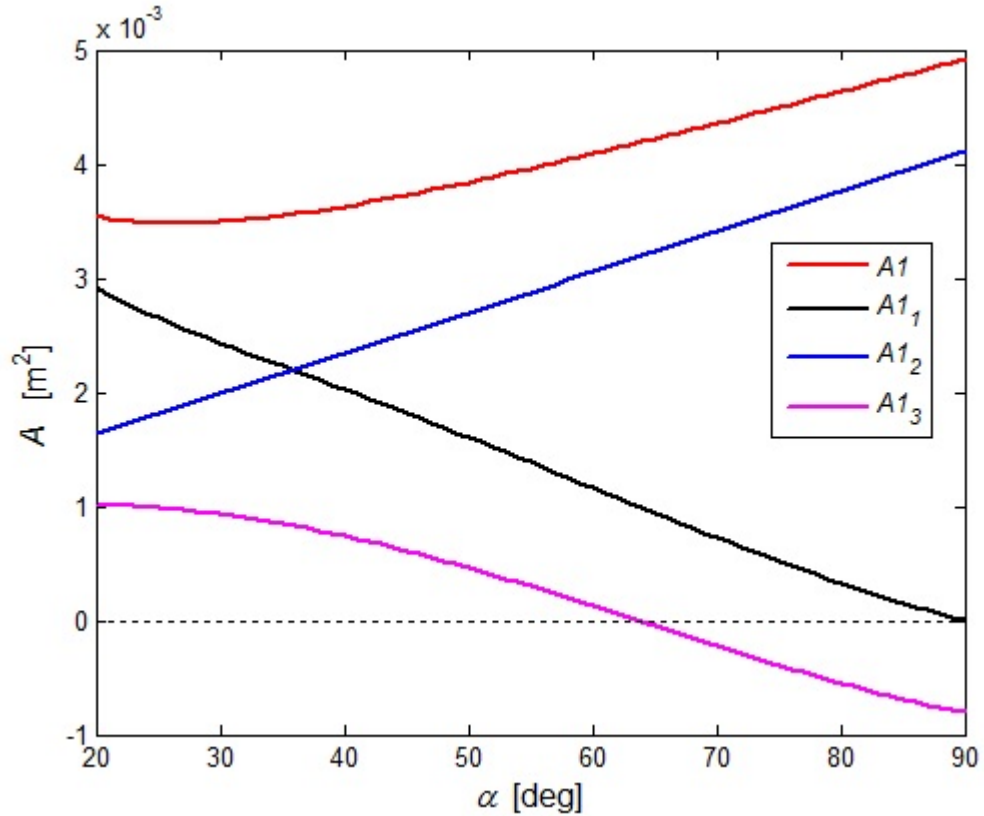
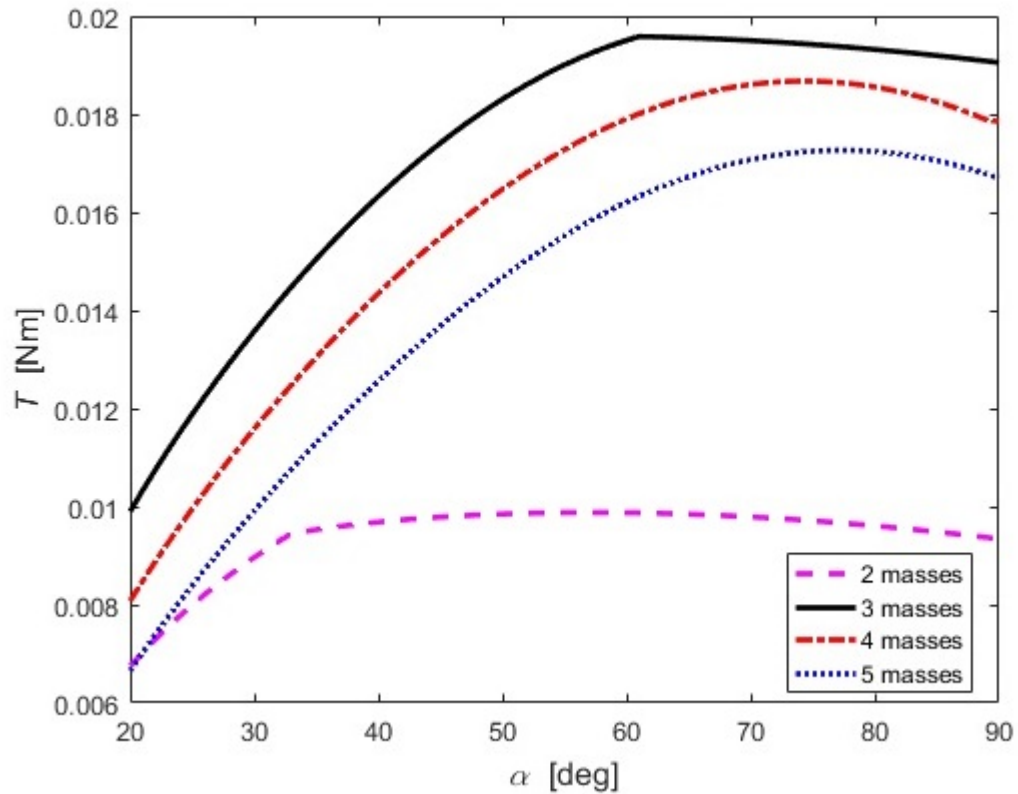


Figura 4.18: Momento statico del caso a due palle e sue componenti

Da esso è possibile infatti vedere che la componente A_{13} cambia di segno e confermare quanto detto per la componente S_{x13} . Passando alle caratteristiche di coppia, esse mostrano come la massima coppia si registri per angoli α diversi da quelli dove yG è massima. Imponendo un valore di $\theta = 50^\circ$ come valore di massima oscillazione del pendolo, si potrà trovare la coppia di reazione tramite la relazione matematica:

$$T_r = M \cdot g \cdot |yG| \cdot \sin(\theta) \quad (4.45)$$


 Figura 4.19: Confronto di T in funzione di α nelle varie configurazioni

Si osserva dalla figura la comparazione tra le caratteristiche di coppia nelle diverse configurazioni e risulta che la massima coppia in assoluto viene registrata nella configurazione a 3 masse per un angolo $\alpha = 61^\circ$. Contrariamente a quello che ci si potrebbe aspettare la seconda coppia maggiore è quella sviluppata dal caso a 4 masse e non quella sviluppata dal caso a 5 masse che presenta una struttura simmetrica e molto simile a quella del caso a 3 masse. Il caso a due masse resterà invece il caso più svantaggioso.

Focalizzando l'attenzione sulla migliore configurazione, ovvero 3 masse con apertura angolare del pendolo $\alpha = 61^\circ$ si può ricavare il massimo valore di coppia. Ricordando quindi la configurazione e imponendo le costanti si ottengono per $\alpha = 61^\circ$ le seguenti caratteristiche:

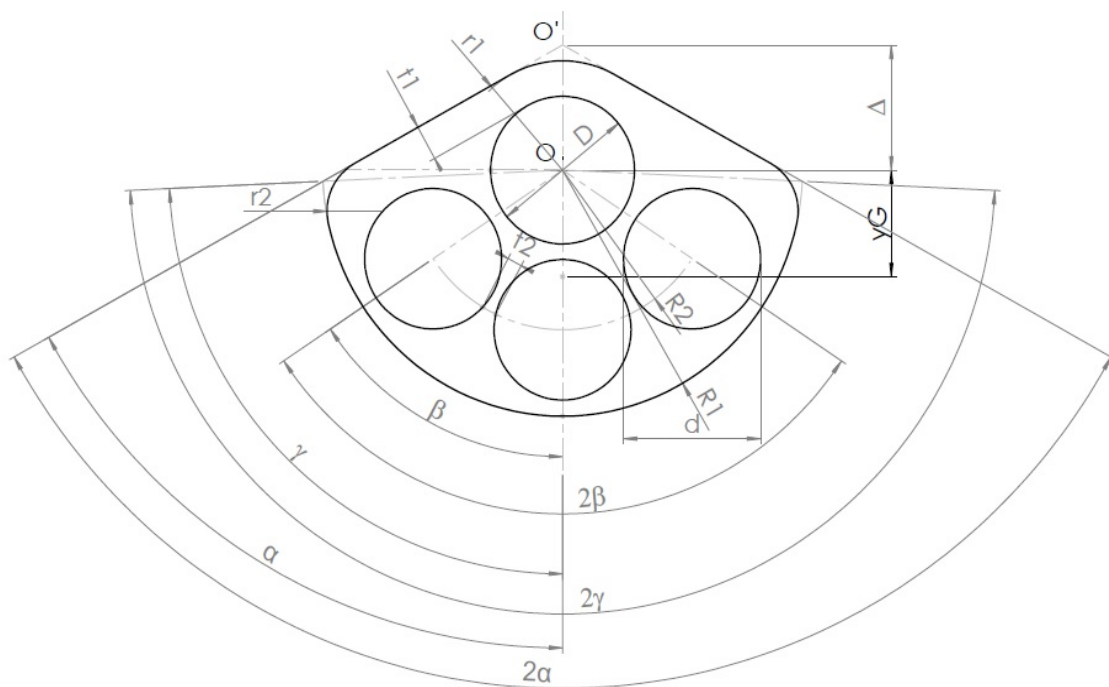


Figura 4.20: Pendolo a 3 masse

Variabile	Valore
α	61°
β	56.29°
d	25.7 mm
R_2	29.2 mm
γ	87.88°
yG	19.5 mm
Δ	22.9 mm

Intersecando il valore di $\alpha = 61^\circ$ con la caratteristica di coppia si ottiene un valore di coppia di 0.019 Nm.

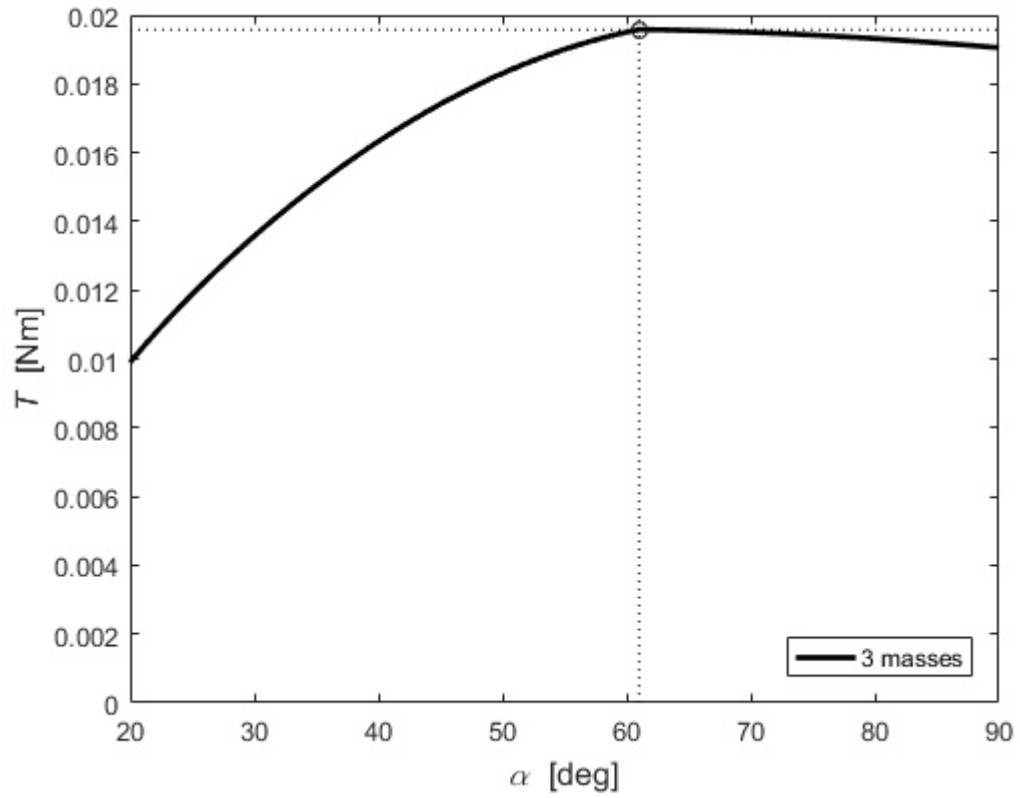


Figura 4.21: Variazione di T in funzione di α

Capitolo 5

Analisi dei risultati del modello dell'energy harvester per cuscinetto volvente

Utilizzando i dati di yG, massa e momento d'inerzia ricavati dalla progettazione del pendolo per il caso con 3 masse (caso che risulta restituire la maggior coppia) , si simula il funzionamento del energy harvester tramite il modello creato in simulink. Le prove di simulazione sono fatte usando entrambi i tipi di input per una finestra temporale di 10 s. L'analisi dei risultati viene condotta parallelamente fra i due tipi di input dati e inserendo nella maschera del blocco "Pendulum" i dati relativi alla configurazione del pendolo a 3 masse in condizioni di massima coppia in funzione di α . Analizzando per prima gli output del blocco Input si vede che in modalità velocità costante ($\omega = 14.62 \frac{rad}{s}$) il sistema restituisce come output del blocco input un grafico di posizione angolare che cresce linearmente (linea blu) e uno di velocità angolare costante (linea rossa). Nel caso con ingresso di velocità transitorio il blocco Input restituisce in uscita un grafico di posizione angolare (linea blu) molto simile al caso costante, fatta eccezione per i primi istanti e uno di velocità angolare (linea rossa), che presenta un transitorio del secondo ordine con un tempo di salita di 5s. Dopo il transitorio il grafico raggiunge la velocità di $\omega = 14.62 \frac{rad}{s}$ (140

rpm) esattamente come al caso precedente. Questa modalità di input permette di simulare l'avviamento della flangia.

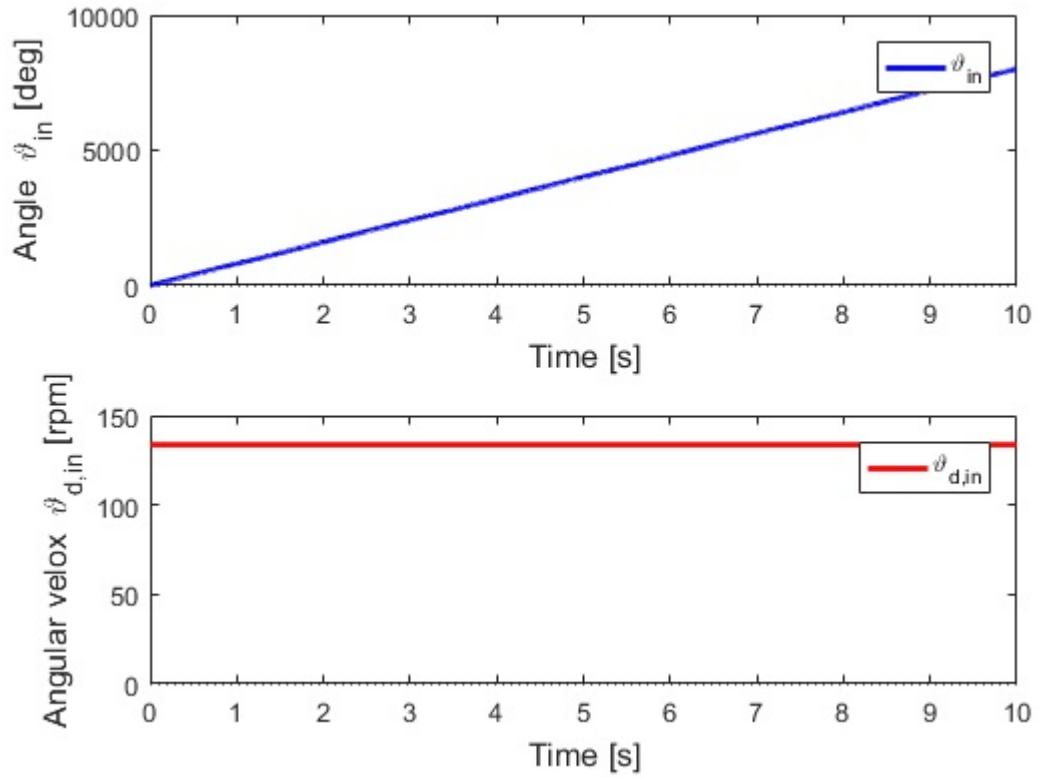


Figura 5.1: Caratteristiche di posizione e velocità angolare della flangia con Input di velocità costante

Le caratteristica degli ingressi mostrano come nel caso di Input costante il sistema presenti una crescita della posizione angolare lineare, mentre nel caso di Input con transitorio di avviamento dopo un transitorio iniziale il pendolo si stabilizza alla velocità ω fissata.

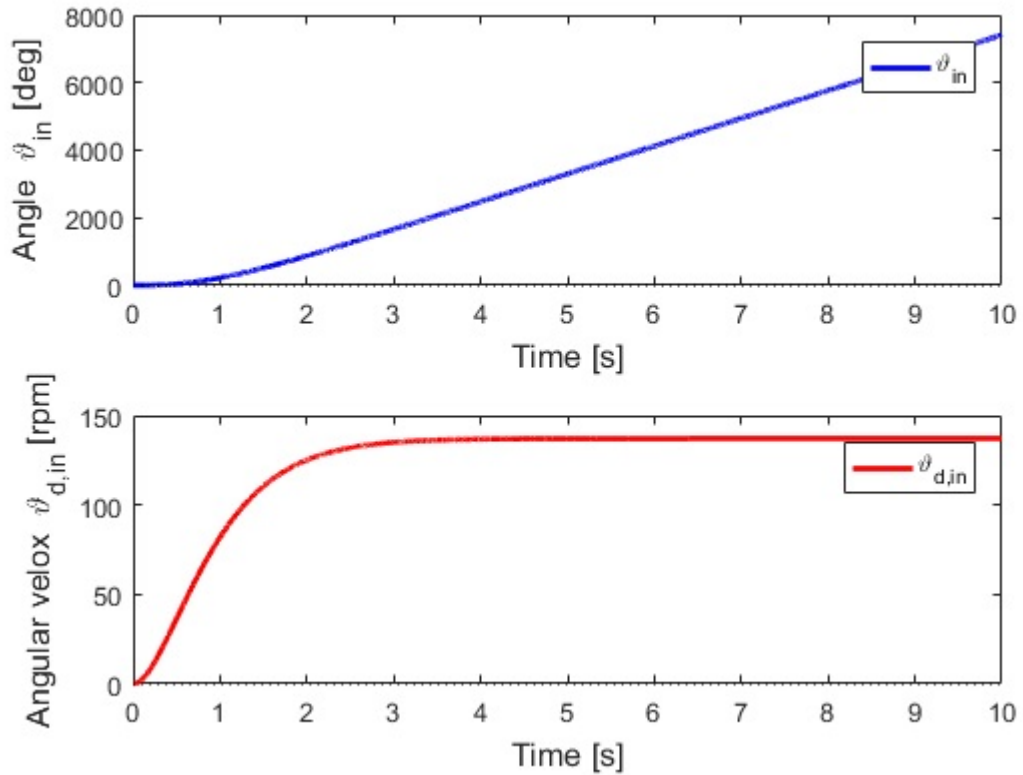


Figura 5.2: Caratteristiche di posizione e velocità angolare della flangia con Input di velocità transitoria

Il sistema pendolo risponde a questi ingressi e presenta grafici (Figura 5.2) di posizione angolare (linea blu) e velocità angolare (linea rossa) dove dopo un transitorio iniziale il pendolo si stabilizza intorno alla posizione stabilita nel caso con Input con transitorio. Nel caso con Input di velocità costante il sistema si trovea di fronte a un ingresso a gradino e risponde con uno spike di velocità seguito da un andamento mediamente nullo. La posizione del pendolo sarà istantaneamente intorno alla posizione θ fissata. Entrambi gli andamenti sono caratterizzati da ripple.

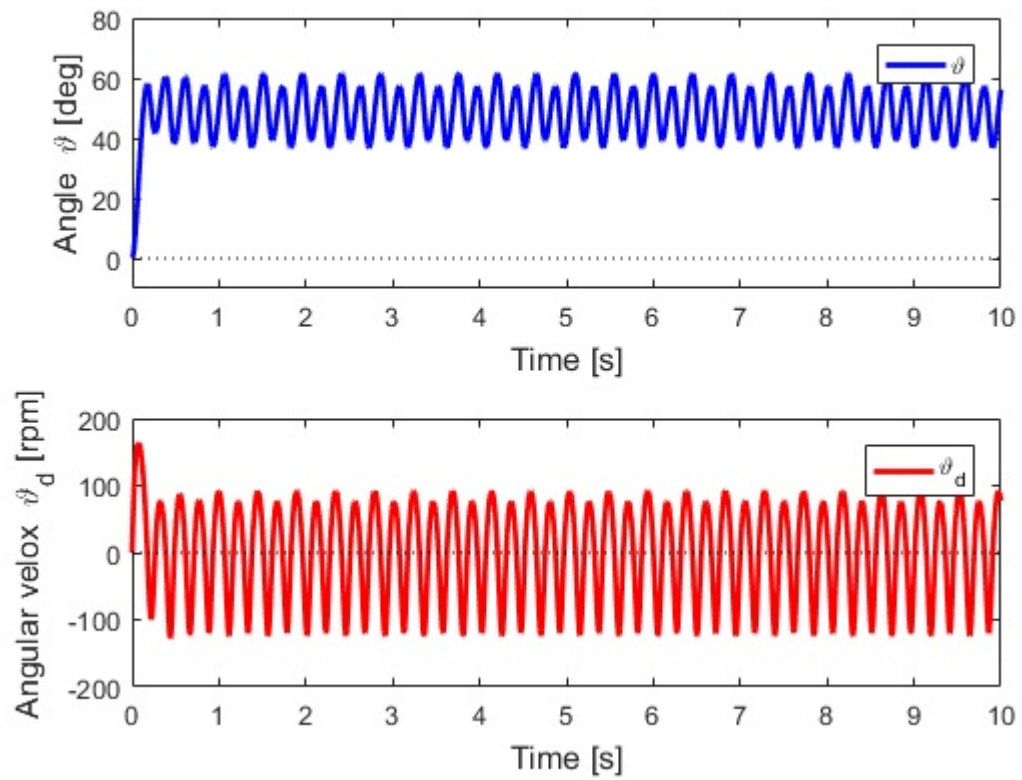


Figura 5.3: Caratteristiche di posizione e velocità angolare del pendolo con Input di velocità costante

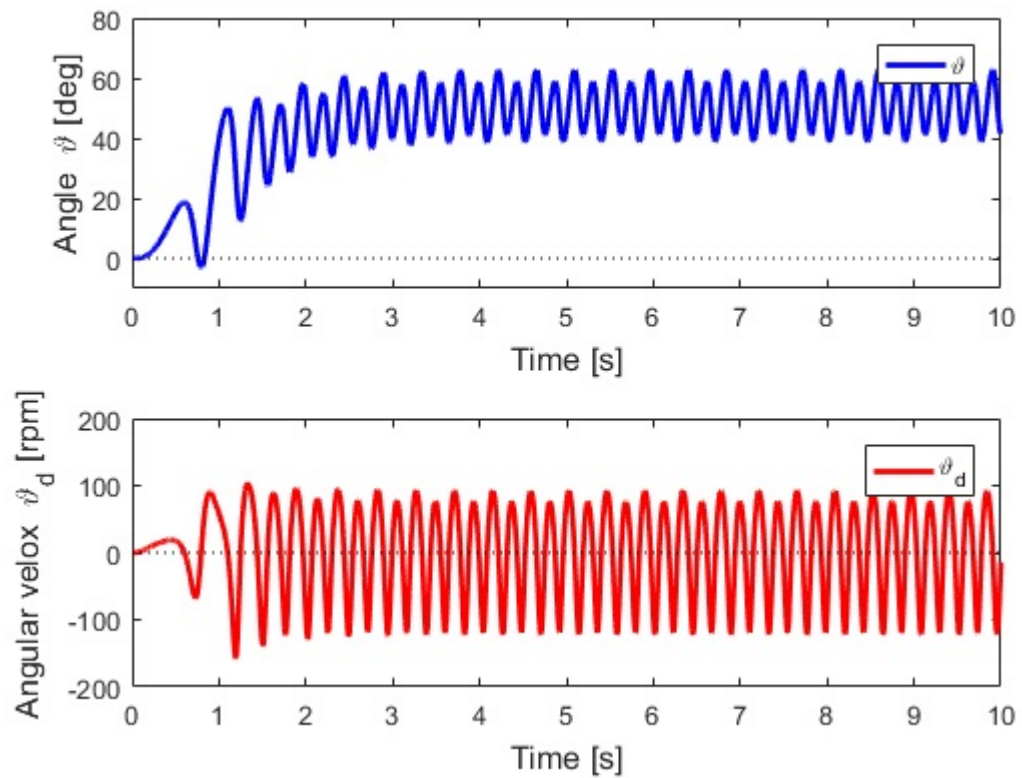


Figura 5.4: Caratteristiche di posizione e velocità angolare del pendolo con Input di velocità transitoria

Processando gli output del blocco Input e Pendulum appena analizzati il blocco CoilMagnet restituisce quelle che sono le grandezze elettriche del sistema.

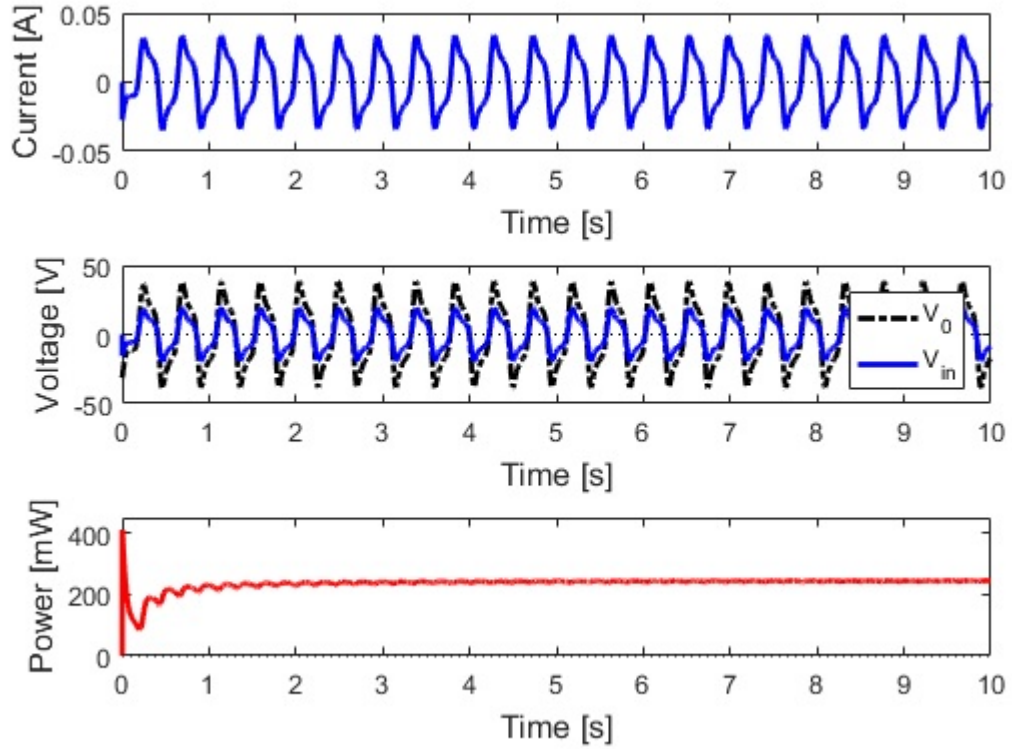


Figura 5.5: Parametri elettrici blocco CoilMagnet con Input di velocità costante

Per quanto riguarda la potenza media nel caso costante essa ha forti oscillazioni (spike di potenza) nei primi istanti dovuti al fatto che il sistema si trova a lavorare subito con la velocità $\omega = 14.62 \frac{rad}{s}$. Guardando le figure si può notare come tensione e corrente siano precisamente uguali dopo la fine del transitorio. Il loro andamento è distorto rispetto all'andamento sinusoidale che si vorrebbe ottenere, questo perché i blocchi Pendulum e CoilMagnet sono collegati in anello chiuso. Nel blocco Pendulum la coppia meccanica dovuta ad attriti di accoppiamento tra pendolo e cuscinetto va incidere sui nuovi valori di posizione e velocità che torneranno indietro come input al blocco CoilMagnet.

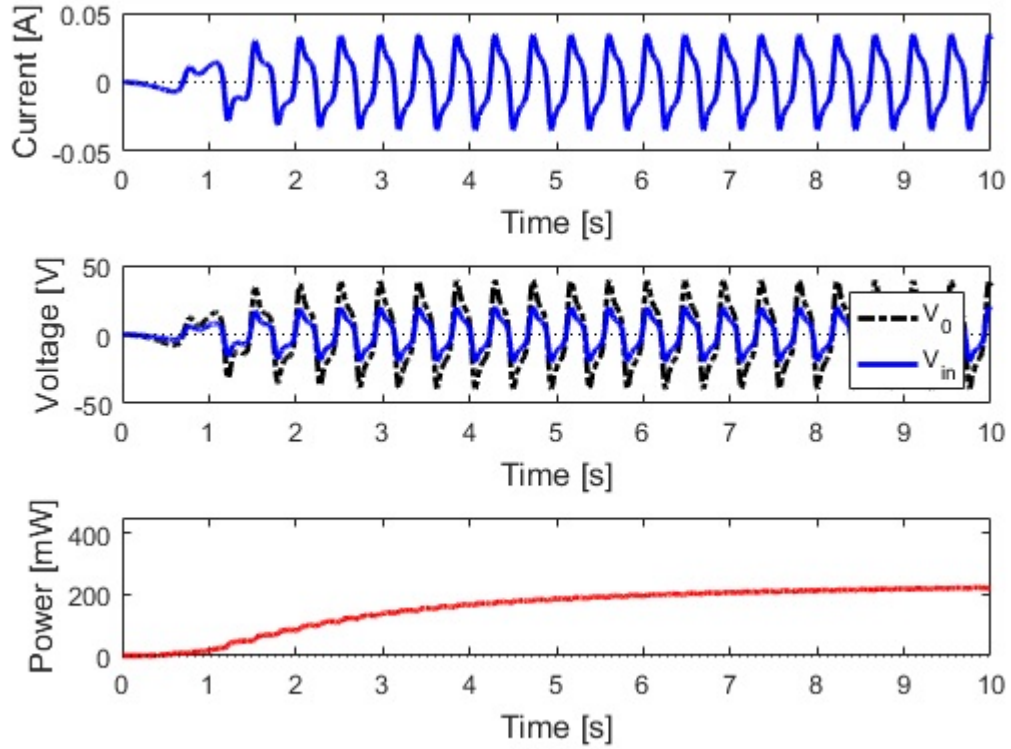


Figura 5.6: Parametri elettrici blocco CoilMagnet con Input di velocità transitoria

Altro output del blocco CoilMagnet é la coppia meccanica. Dalle figure é possibile subito notare che la coppia sar  una forma d'onda a frequenza doppia rispetto a tensione e corrente. Questo perch  essa deriva dalla potenza elettrica che   data dal prodotto fra tensione e corrente. Il valore massimo di questa coppia   ottenuto da:

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (5.1)$$

Ricordando che siamo in condizioni di equilibrio elettro - meccanico ($P_m = P_{el}$), con un valore massimo di $P_{el} = 0,56W$ si otterr  una coppia massima $T = 0,038 \text{ Nm}$.

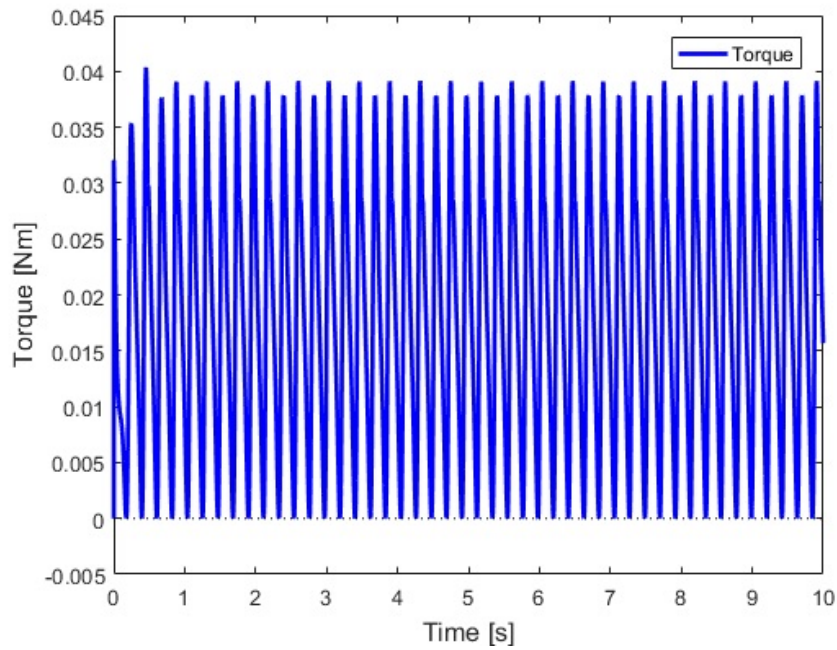


Figura 5.7: Coppia meccanica per ingresso costante

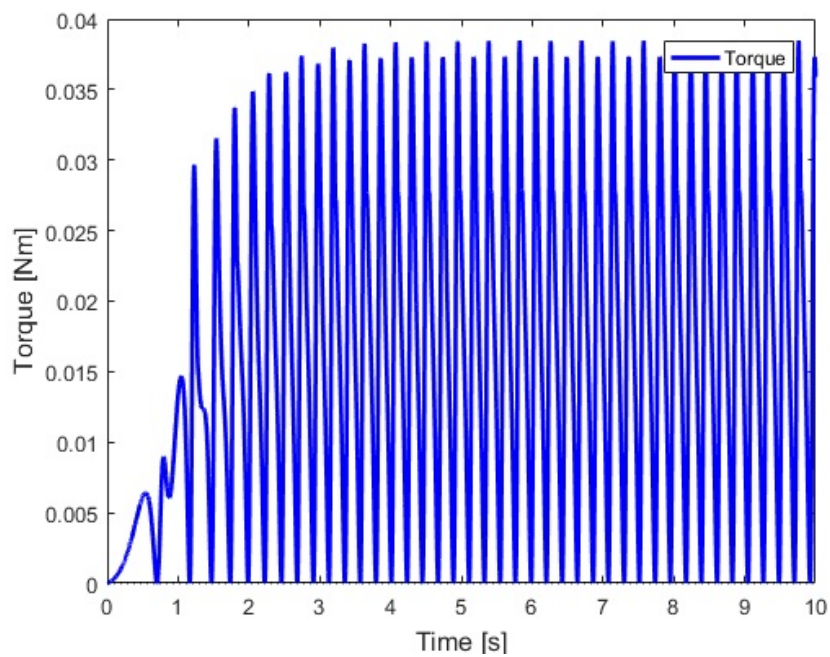


Figura 5.8: Coppia meccanica per ingresso transitorio

Capitolo 6

Conclusioni e fase prototipale futura

Per concludere la realizzazione di questo progetto ha evidenziato come sia possibile ottenere buoni risultati in termini di coppia e potenza anche con un dispositivo che ruota in modo abbastanza lento. Questo progetto e le sue relative simulazioni possono dar via a una fase prototipale futura, in quanto come visto i risultati ottenuti risultano essere molto promettenti. Ovviamente la fase prototipale futura dove tener conto di alcune problematiche quali la mancanza sul mercato dei componenti previsti in fase di progetto. Questo porta inevitabilmente a dover optare per componenti simili che portano a un degrado delle prestazioni. Inoltre nella progettazione finora affrontata non si é tenuto conto dei supporti su cui alloggiare magneti e bobine e la plastica di protezione dell'intero harvester che deve contenere oltre ai magneti e alle bobine, al pendolo e ai relativi supporti, l'elettronica necessaria per trasmettere le informazioni relative al monitoraggio del cuscinetto per cui l'harvester é stato pensato.

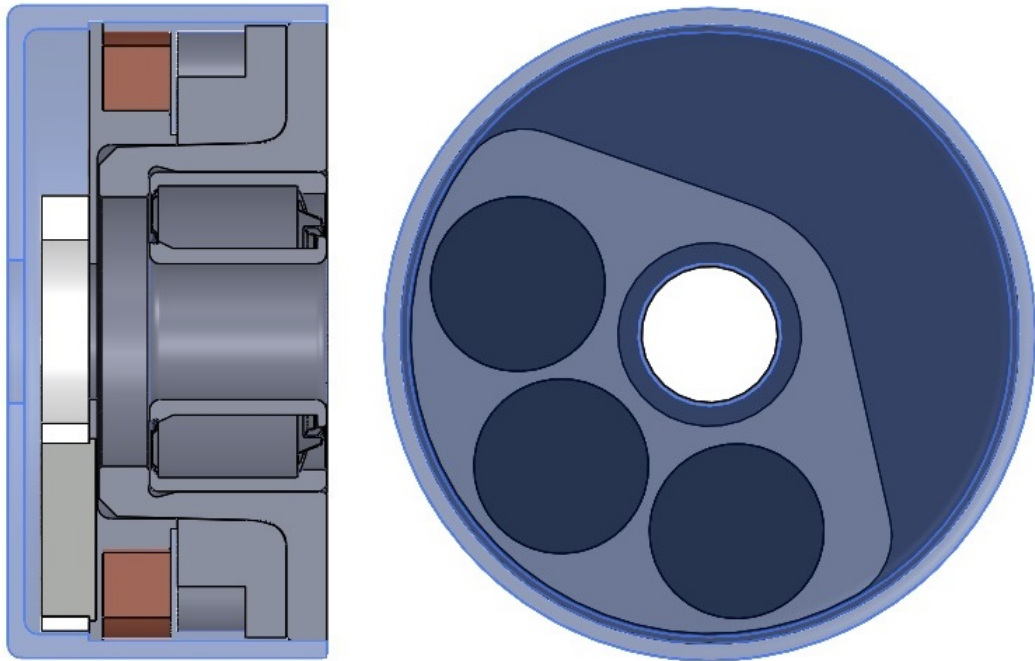


Figura 6.1: Modello 3-D: Vista in sezione e vista frontale

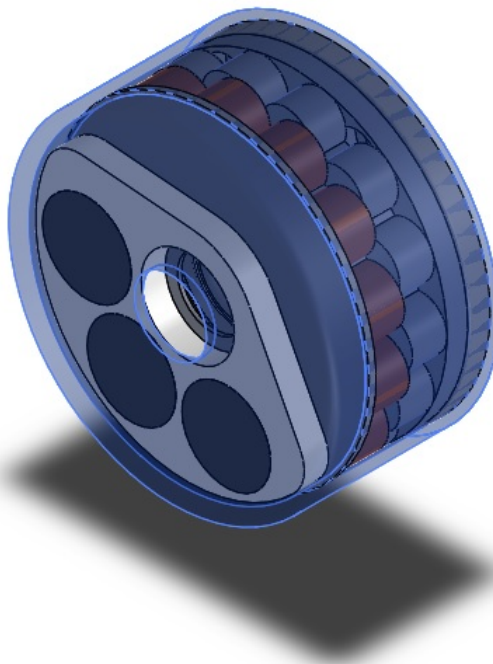


Figura 6.2: Modello 3-D prototipo energy harvester

Appendice A - Migliore configurazione del pendolo per flangia rotante nei vari casi

Variabile	Conf. 2 masse	Conf. 4 masse	Conf. 5 masse
α	58°	75°	78°
β	28.22°	49.28°	40.68°
d	25.7 mm	23.2 mm	19.8 mm
R_2	29.1 mm	30.4 mm	32.1 mm
γ	84.38°	100.98°	104.4°
y_G	13.5 mm	17 mm	16.88 mm
Δ	22.9 mm	20.7 mm	20.45 mm

Appendice B - DualLab

DualLab é una collezione di MATLAB routines utili a costruire un risolutore per i problemi agli elementi finiti, in un ambiente per testare le nuove formulazioni, usando il "Cell Method", ovvero un metodo per discretizzare le funzioni nelle simulazioni.

Bibliografia

1. Bonisoli, Manca, Repetto, "Multi-physics optimisation of energy harvesters", 2015.
2. Tornincasa, Repetto, Bonisoli, Di Monaco, "Energy harvester for vehicle tires Nonlinear dynamics and experimental outcomes".
3. Nicolás Manca, "Functional modelling and prototyping of electronic integrated kinetic energy harvesters".
4. F. Profumo, A. Tenconi, Z. Zhang, A. Cavagnino, "Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor Realized with Powered Soft Magnetic Materials", Conf. Rec. IEEE - IAS 1998, St. Louis (MO), USA, pp. 152-158.
5. F. Profumo, A. Tenconi, Z. Zhang, A. Cavagnino, "Design and Realization of a Novel Axial Flux Interior PM Synchronous Motor for Wheel-motor Application", Conf. Rec. ICEM '98, Istanbul, Turkey, September 1998, pp. 1797-1801.
6. M. Lazzari, "Appunti del Corso di Modellistica dei Sistemi Elettromeccanici", A.A. 1998/99.
7. A. Vagati, "Appunti del Corso ad Azionamenti Elettrici per l'Automazione", A.A. 1997/98.
8. "ROTATIONAL ENERGY HARVESTER FOR BODY MOTION", E. Romero¹, M.R. Neuman², and R.O. Warrington^{2,3}
¹University of Turabo, Gurabo, Puerto Rico, USA
²Michigan Technological University, Houghton, Michigan, USA

2Center for Wireless Integrated MicroSystems, Ann Arbor, Michigan, USA.

9. Xiaomin Dong, "Design and characterization of axial flux permanent magnet energy harvester for vehicle magnetorheological damper".
10. "[http://www.lar.deis.unibo.it/people/rnaldi/ANNO%202006-2007/LA/Esercitazione%201%20LA%20\(MATLAB-SIMULINK\)/simulink_03_11_06.pdf](http://www.lar.deis.unibo.it/people/rnaldi/ANNO%202006-2007/LA/Esercitazione%201%20LA%20(MATLAB-SIMULINK)/simulink_03_11_06.pdf)"
11. Cell Lab a MATLAB environment for the development of 2D cell method codes.