



**Università degli Studi di Padova**

---

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE**

**Corso di Laurea Magistrale di Ingegneria Elettrica**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**PROGETTAZIONE E CONTROLLO DI UN CUSCINETTO  
MAGNETICO PER SISTEMI A VOLANO**

**DESIGN AND CONTROL OF A MAGNETIC BEARING FOR  
FLYWHEEL SYSTEMS**

Candidato:  
**Enrico Scaldaferrò**  
Matricola 1057844

Relatore:  
**Prof. Andrea Tortella**

---

**Anno Accademico 2014-2015**



# Indice

---

1. Sistemi di accumulo dell'energia	Pag. 1
1.1. PHES	Pag. 3
1.2. CAES	Pag. 5
1.3. SMES	Pag. 6
1.4. Supercondensatori	Pag. 7
1.5. Batterie elettrochimiche	Pag. 9
1.6. Riepilogo delle caratteristiche	Pag. 12
2. Volani per l'accumulo di energia cinetica	Pag. 13
2.1. Principio di funzionamento	Pag. 13
2.2. Materiali	Pag. 14
2.3. Geometria	Pag. 15
2.4. Accoppiamento elettromeccanico	Pag. 15
2.5. Cuscinetti	Pag. 16
2.6. Involucro	Pag. 17
2.7. Elettronica di potenza	Pag. 18
2.8. Caratteristiche generali	Pag. 19
2.9. Principali applicazioni	Pag. 19
3. Cuscinetti magnetici	Pag. 25
3.1. Cenni storici e teorici	Pag. 26
3.2. Classificazione dei cuscinetti magnetici	Pag. 26
3.2.1. Sospensione elettromagnetica	Pag. 28
3.2.2. Sospensione elettrodinamica	Pag. 30
3.3. Tipologia di sensori	Pag. 31
3.3.1. Sensori capacitivi	Pag. 31
3.3.2. Sensori induttivi	Pag. 32
3.3.3. Sensori ottici	Pag. 33
3.3.4. Sensori laser	Pag. 34
3.3.5. Sensori ad ultrasuoni	Pag. 35
4. Progetto preliminare del cuscinetto magnetico	Pag. 37
4.1. Caratterizzazione del sistema	Pag. 37
4.2. Materiali	Pag. 39
4.3. Introduzione di Ansys Maxwell	Pag. 41
4.3.1. Utilizzo dell'Ottimizzatore	Pag. 42
4.4. Criterio del "Pareggio delle aree"	Pag. 44
4.5. Dimensionamento del magnete e del circuito ferromagnetico	Pag. 46
4.6. Validazione efficacia delle compensazione di forza verticale della configurazione ibrida magnete-bobina	Pag. 50
4.7. Validazione efficacia delle compensazione di forza radiale della configurazione ibrida magnete-bobina	Pag. 53
5. Progettazione del modello integrato	Pag. 59
5.1. Dimensionamento dei magneti	Pag. 59
5.2. Dimensionamento delle bobine di controllo	Pag. 62

5.3. Caratterizzazione dell'assieme	Pag. 65
5.4. Caratterizzazione del modello al variare della temperatura	Pag. 72
5.5. Calcolo dell'induttanza delle bobine	Pag. 74
6. Controllo di traferro	Pag. 77
6.1. Introduzione a Simulink	Pag. 77
6.2. Cenni teorici	Pag. 77
6.2.1. Linearizzazione del sistema	Pag. 78
6.3. Definizione del problema	Pag. 80
6.3.1. Parametri dipendenti dalla temperatura	Pag. 82
6.3.2. Dettaglio sottosistema "Data Force Permanent Magnets"	Pag. 84
6.3.3. Dettaglio sottosistema "Negative Coil Dynamics" e "Positive Coil Dynamics"	Pag. 85
6.3.4. Dettaglio sottosistema "Data Force Negative Coil" e "Data Force Positive Coil"	Pag. 88
6.3.5. Dettaglio sottosistema "Losses"	Pag. 91
6.4. Controllore PID	Pag. 91
6.5. Analisi di funzionamento del sistema	Pag. 92
6.5.1. Sistemi di controllo	Pag. 92
6.5.2. Evoluzione libera	Pag. 96
6.5.3. Disturbo $\Delta z$ non nullo	Pag. 97
6.5.4. Variazione di massa del volano	Pag. 99
6.5.5. Variazione di temperatura	Pag. 103
7. Conclusioni	Pag. 105
8. Bibliografia	Pag. 107

*“Alla mia famiglia e a chi mi ha sempre sostenuto durante la formazione universitaria”*



## Sommario

---

Con il presente elaborato si vuole presentare lo studio di un'applicazione di bassa potenza basata nell'utilizzo di un cuscinetto a levitazione magnetica. Il campo di interesse è l'accumulo stazionario di energia elettrica in energia cinetica, mediante masse rotanti ad elevata velocità.

Il principale motivo di studio di tale tecnologia risiede nella crescente competitività dei volani rispetto ai più diffusi e apparentemente meno costosi sistemi di accumulo di energia (come per esempio le batterie elettrochimiche) nonché lo sfruttamento di numerosi vantaggi in termini di accoppiamento meccanico e di dissipazione di energia che consegue l'uso di sistemi di tipo "contact free".

L'obiettivo primario del lavoro è quello di modellizzare un sistema di sostegno e di controllo ibrido (magnete e bobina), il più compatto possibile, capace di mantenere in sospensione stabile la massa rotante, rispetto una predefinita condizione di equilibrio. Il relativo studio di dimensionamento è stato condotto mediante l'ausilio del software di analisi agli elementi finiti Ansys® Maxwell 2D.

Per quanto concerne la validità del modello progettato, si è passati allo studio della dinamica del modello mediante software di simulazione dinamica Matlab® Simulink.. Più precisamente è stato implementato il controllo verticale di traferro che consente il corretto posizionamento assiale del volano a seguito di diverse tipologie di disturbi ad esso applicati.



## 1. Sistemi di accumulo dell'energia

---

La crescente penetrazione dei sistemi di generazione da fonte rinnovabile ha consentito una marcata riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di altri gas inquinanti rilasciati in atmosfera, dovuti in larga misura da politiche e normative imposte ai diversi paesi del mondo. Tuttavia, in questa situazione, la rete di trasmissione elettrica è chiamata a sostenere flussi di potenza intensi e fortemente variabili che possono mettere in discussione le condizioni di stabilità e bilanciamento tra domanda e offerta di energia. Sovente, questi due aspetti chiave, difficilmente coesistono a causa di innumerevoli varianti che legano la produzione e la trasmissione di energia: prima di tutte la non programmabilità delle fonti rinnovabili. Stabilità, affidabilità e qualità devono poter essere garantiti quando sono collegate alla rete numerose sorgenti di energia intermittente.

Una soluzione affinché i suddetti obiettivi principali possono coesistere è quella di integrare i sistemi di generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili con sistemi di accumulo. In breve, l'accumulo consente di disaccoppiare istantaneamente domanda e offerta in un certo istante di tempo [1]:

*“L'accumulo di energia è un modo di modificare le equazioni base della produzione di energia elettrica secondo cui ciò che si produce deve essere uguale a quello che viene consumato”*

Esistono e sono in continuo sviluppo numerose tipologie di sistemi finalizzati all'accumulo di energia la cui diversità tecnologica ben si presta a molteplici condizioni operative distinte. Le tecnologie che hanno riscosso più successo sono quelle riportate nel grafico di Figura 1.1, premessa la classificazione adottata in [2] secondo le seguenti categorie:

- Accumulo di energia cinetica/meccanica (Volani, CAES<sup>1</sup>);
- Accumulo sottoforma di energia potenziale (PHES<sup>2</sup> o Pompaggio);
- Accumulo elettrochimico (Batterie);
- Accumulo di energia elettrostatica (Supercondensatori);
- Accumulo di energia elettromagnetica (SMES<sup>3</sup>).

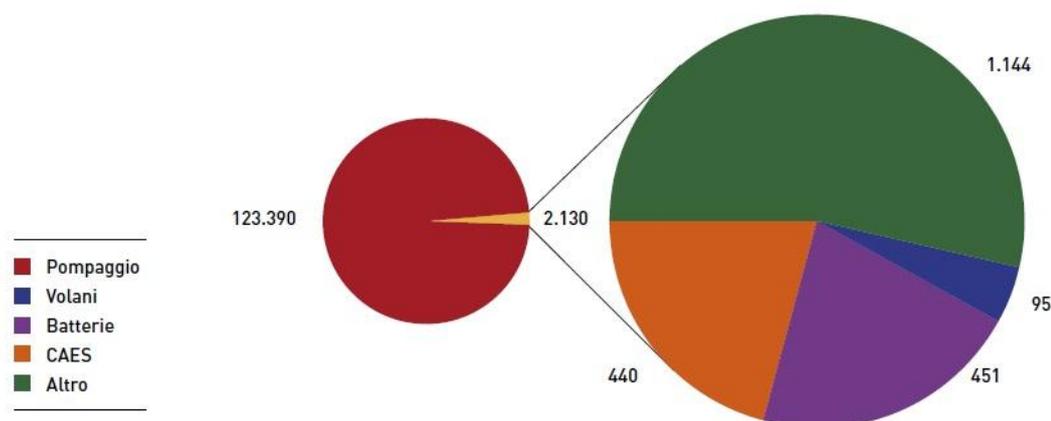


Figura 1.1 – Capacità di accumulo in MW installata nel mondo al 2010.

<sup>1</sup> CAES: Compressed Air Energy Storage.

<sup>2</sup> PHES: Pumped Hydro Energy Storage.

<sup>3</sup> SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage.

Ora, quale tra le tipologie sopra elencate è la più appropriata per una data applicazione? La risposta non è banale e senza dubbio dipende dai requisiti che il sistema possiede e da quelli che deve garantire. La Figura 1.2 evidenzia le principali tecnologie di accumulo in termini di potenza/tempo. Principalmente un sistema di accumulo è chiamato a fornire in un dato intervallo di tempo, un certo livello di potenza da erogare e/o assorbire. Da questa indicazione è possibile classificare ulteriormente i sistemi particolarmente adatti per “applicazioni di potenza”, cioè quei sistemi maggiormente consoni a svolgere funzioni di supporto della rete in tempi molto brevi e ad elevate potenze: tra questi i servizi di regolazione di tensione, regolazione primaria della frequenza e i servizi di Power Quality (ne fanno parte tutti quei servizi atti a migliorare la qualità del servizio di fornitura elettrica evitando buchi di tensione, sovratensioni e squilibri di tensione). Dall’altro lato vi sono le “applicazioni in energia”, ovvero quella serie di tecnologie maggiormente adatte a svolgere compiti di sostegno della rete per tempi prolungati come il Peak Shaving (letteralmente “taglio” del picco di carico, cioè vengono utilizzate fonti di energia economicamente più convenienti per coprire le punte di domanda (per esempio le fonti rinnovabili) ed il Time-Shift (letteralmente inteso come spostamento di energia nel tempo, per esempio da un periodo economicamente favorevole all’accumulo di energia e al rilascio della stessa in un momento successivo).

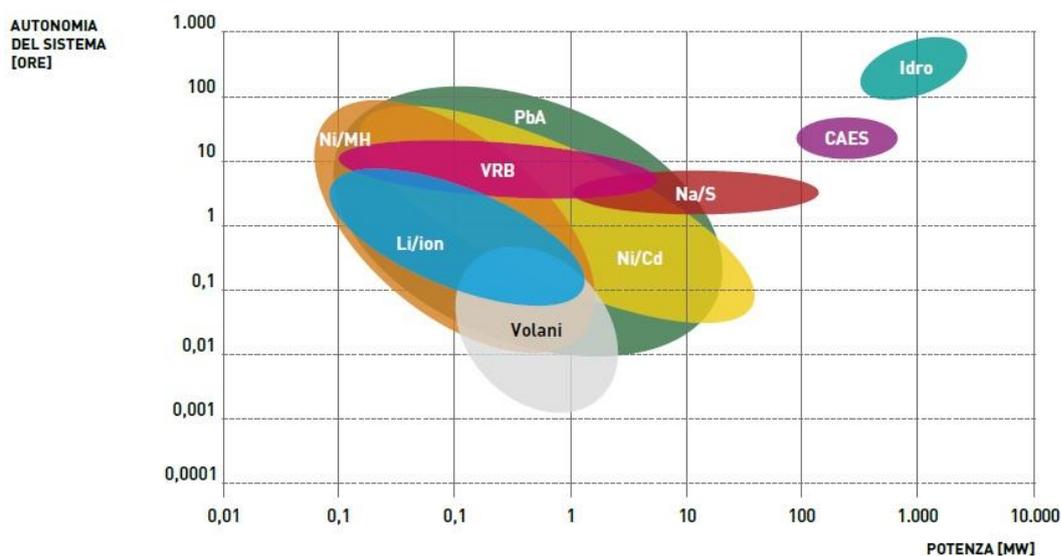


Figura 1.2 – Confronto in termini di potenza/autonomia delle diverse tecnologie di accumulo dell’energia.

Non meno importante è definire il grado di maturazione delle diverse tecnologie in quanto incide fortemente sul costo della stessa e dunque sul livello di competitività. La Figura 1.3 classifica le tecnologie di accumulo di energia sulla base dell’indice di sviluppo atteso al 2030. Da questa si può notare come alcune batterie elettrochimiche e i volani siano in posizione di transizione tra l’essere una tecnologia matura ed una semplice applicazione di laboratorio, situazione che si riflette oggi attraverso il particolare interesse suscitato verso queste due tecnologie. La punta della freccia a sinistra indica lo stato corrente della tecnologia, la punta di freccia a destra indica il livello di sviluppo atteso al 2030.

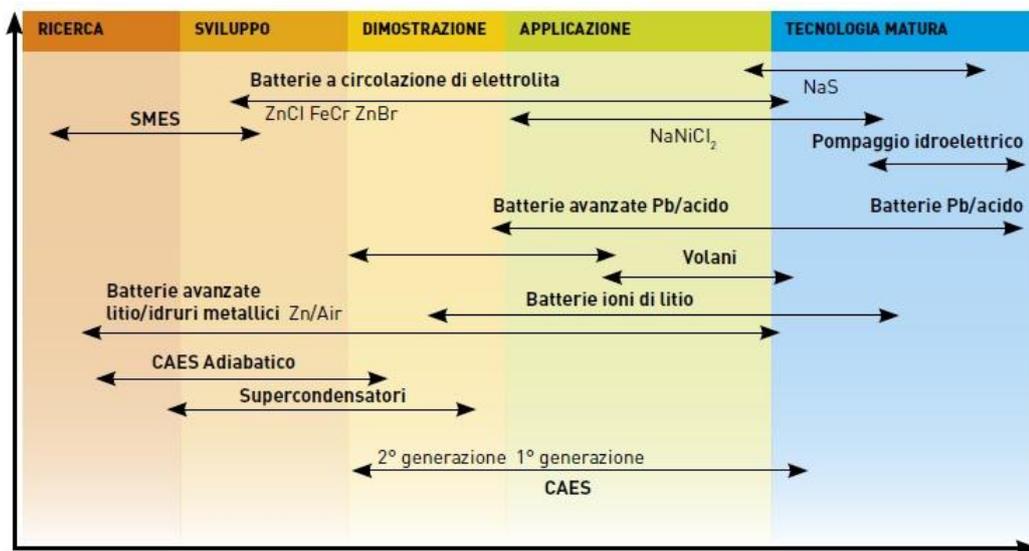


Figura 1.3 – Indice di sviluppo delle tecnologie di accumulo al 2030.

Nei paragrafi successivi sono invece brevemente descritte le “macro categorie” dei diversi sistemi di accumulo dell’energia elettrica esistenti, trascurando i volani, i quali saranno oggetto di maggiore approfondimento nei capitoli successivi.

### 1.1 PHES

L’accumulo di energia potenziale risulta attualmente il più diffuso, nella forma del pompaggio idroelettrico, almeno per grandi potenze e permette di accumulare grandi quantità di energia a costi decisamente vantaggiosi. È una tecnologia molto matura, basti pensare che la prima stazione di pompaggio idroelettrica fu costruita in Italia e Svizzera intorno al 1890.

Il principio di funzionamento degli impianti di questo tipo è relativamente semplice: ci sono due serbatoi (naturali, come laghi, o bacini artificiali o anche il mare) localizzati a differenti altitudini, uno a valle e uno a monte dell’impianto di generazione (Figura 1.4). Durante i periodi di scarsa domanda di energia, si pompa l’acqua dal serbatoio inferiore a quello superiore, immagazzinando l’energia sotto forma di energia potenziale.

$$E_p = MgH \tag{1.1}$$

$M$  massa del fluido,  $g$  accelerazione di gravità,  $H$  differenza di quota tra i due bacini.

Nei periodi di elevata domanda, l’acqua del serbatoio superiore è veicolata in quello inferiore, generando energia. Nell’arco di una giornata, i periodi di pompaggio e turbinaggio sono generalmente quelli notturni e diurni: i primi sono caratterizzati da bassa domanda e basso costo dell’energia, i secondi invece è l’opposto.

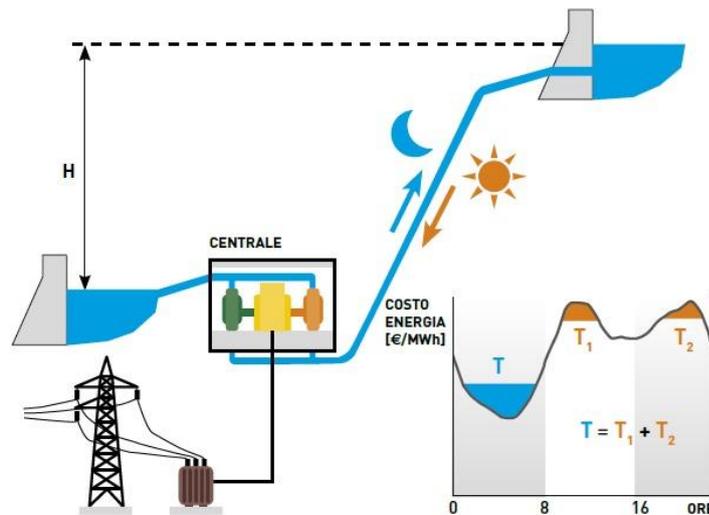


Figura 1.4 - Schema di principio degli impianti di pompaggio idroelettrico.

Le taglie di questi tipi di impianti si spingono ben oltre i 1000 MW di potenza con tempi di scarica attorno alle 6-12 h e tempi di risposta di decine di secondi. L'efficienza complessiva assume valori di circa 70-85% a seconda dei gruppi di motore/generazione e turbina/pompa utilizzati. I rendimenti più elevati si ottengono con due gruppi binari indipendenti composti da motore-pompa e generatore-turbina. Un "Gruppo Binario" è composto da motore-pompa e generatore-turbina distinti, per la quale ciascuna macchina è dimensionata in modo ottimale (massimo rendimento); in un "Gruppo Ternario" invece, la macchina elettrica è unica (funzionamento da motore e generatore), mentre vi sono due macchine idrauliche distinte (nota: il rendimento complessivo d'impianto dipende molto dall'efficienza della macchina idraulica). Con il passare degli anni, vi è stato un deciso incremento dei rendimenti di conversione grazie allo sviluppo di turbine reversibili a velocità variabile. Non solo, negli ultimi anni sono stati studiati e sperimentati con successo prototipi di un impianto di nuova concezione, ad esempio con centrale in caverna che sfruttano invasi naturali (laghi, mare) come serbatoio inferiore (ad esempio a Okinawa in Giappone, nel 1999 fu costruito un impianto di pompaggio di 30 MW, mantenuto in esercizio e monitorato per 5 anni, confermandone infine la validità delle scelte tecniche adottate).

Complessivamente i vantaggi sono:

- Elevata capacità;
- Elevato grado di maturazione della tecnologia.

Gli svantaggi sono invece:

- Impatto ambientale delle costruzioni;
- Elevati costi di investimento;
- Risposta lenta alle richieste di carico.

## 1.2 CAES

I sistemi di accumulo CAES sono una delle tecnologie potenzialmente più interessanti per accumulare quantità considerevoli di energia con basso costo specifico d'investimento. Similmente agli impianti di pompaggio idroelettrici, quelli ad accumulo di aria compressa sono gli unici in grado di rilasciare energia per alcune ore in quantità analoghe a quelle tipiche dei grandi impianti di produzione di energia elettrica (100-1000 MW).

Questi sistemi, ben si integrano con gli impianti di generazione a gas. Nelle ore di scarsa domanda di energia, l'energia generata delle centrali viene utilizzata per comprimere l'aria in caverne sotterranee o in serbatoi artificiali; nel momento in cui vi è un esubero della domanda rispetto la produzione dell'energia, l'aria precedentemente compressa viene mandata in espansori o miscelata al gas combustibile ed inviata alla turbina per produrre energia. Dal punto di vista termodinamico, l'aria viene trattata sia prima dell'introduzione in mandata del compressore, sia prima dell'ingresso in turbina, in modo da essere preriscaldata e deumidificata per evitare fenomeni di cavitazione in turbina e/o pompa. Rispetto i tradizionali impianti a gas, quelli in accoppiamento con i CAES conseguono una riduzione del 40% del combustibile utilizzato a parità di energia elettrica prodotta. In questo contesto si cerca di mitigare la variabilità della produzione inquadrando la tecnologia CAES in virtù della diffusa disponibilità in molte aree del mondo di formazioni geologiche potenzialmente idonee all'accumulo d'aria compressa. Come esempio, di seguito è riportato lo schema base di un impianto di generazione a gas convenzionale e CAES (Figura 1.5).

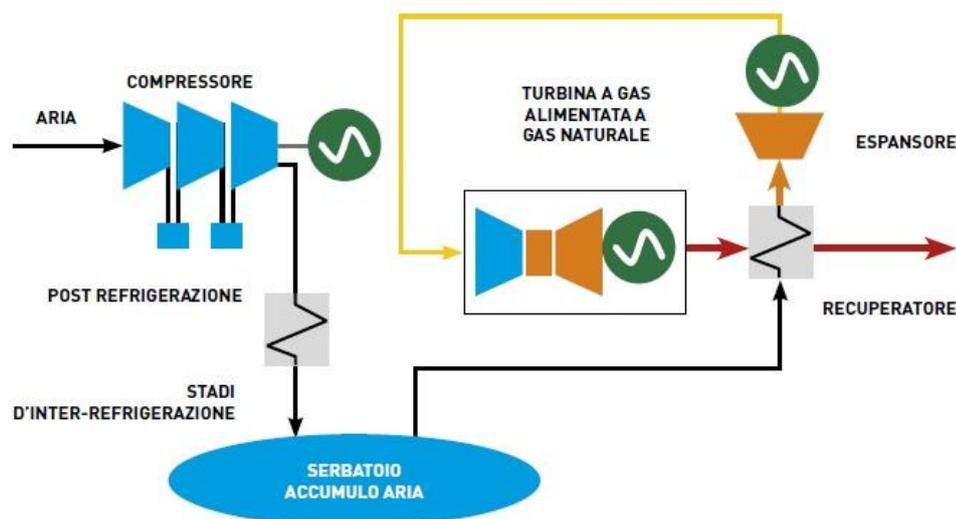


Figura 1.5 - Ciclo impianto a gas e CAES (seconda generazione).

Nel corso degli anni sono state proposte differenti configurazioni impiantistiche con diverso grado di complessità e prestazioni: dal CAES associato alla generazione a gas convenzionale a quello con ciclo combinato o con deumidificazione dell'aria, oppure di tipo adiabatico, isotermo, ibrido, ecc.

Come precedentemente accennato, l'aria compressa può essere accumulata in serbatoi di diversa natura, posti nel sottosuolo (caverne saline, miniere abbandonate, formazioni porose), in serbatoi (metallici e tubazioni) o addirittura sotto il livello del mare, per esempio in combinazione con parchi eolici offshore, in sfere di cemento cave o tramite ancoraggio di palloni sottomarini gonfiabili a profondità di alcune centinaia di metri sotto il livello del mare per accumulare aria in un serbatoio

operante a pressione costante [3]. Ovviamente, da un punto di vista impiantistico, sono preferiti serbatoi operanti a pressione costante e caratterizzati da basse perdite di carico nelle fasi di accumulo ed espansione.

Le potenze di tali impianti vanno da 110 a 290 MW con tempi di scarica fino a 10 h. Nel mondo sono solo due gli impianti tuttora in funzione che hanno adottato tale tecnologia: il primo fu costruito nel 1978 ed è situato in Germania e ha una capacità di 290 MW; il secondo fu costruito nel 1991 in Alabama (USA) avente capacità di 110 MW.

I vantaggi di questa tecnologia sono:

- Elevato dimensionamento in potenza degli impianti;
- Tecnologia consolidata.

Tra gli svantaggi ci sono:

- Elevate barriere geologiche di contenimento del fluido compresso (elevati costi se i serbatoi sono di tipo artificiale);
- Risposta del sistema alle richieste di carico relativamente lenta;
- Basse efficienze di conversione.

Anche se i CAES non hanno riscosso particolare successo e diffusione, si rifletta in merito al fatto che in Italia circa il 50% dell'energia elettrica è prodotta utilizzando gas naturale in cicli combinati in centrali termoelettriche convenzionali e qualora si decidesse di dedicare all'accumulo una frazione anche esigua del gas naturale utilizzato, a parità di consumo di gas e di emissioni di CO<sub>2</sub>, si valorizzerebbe ulteriormente la risorsa energetica primaria non solo come energia, ma anche come servizi al sistema.

### 1.3 SMES

La tecnologia SMES prevede l'immagazzinamento dell'energia in un campo magnetico generato dalla corrente che percorre una bobina di materiale superconduttore, mantenuta al di sotto della relativa temperatura critica (corrispondente a circa 4 K). Al di sotto di questo valore, avviene il fenomeno della superconduttività e le perdite resistive possono essere trascurate. L'energia è data da:

$$E_m = \frac{1}{2}LI^2 = \frac{1}{2}BHV \quad (1.2)$$

Con  $L$  induttanza della bobina,  $I$  corrente,  $BH$  densità di energia magnetica,  $V$  volume in cui è racchiuso il campo magnetico.

L'interfaccia con la rete prevede l'utilizzo di convertitori di potenza costituito da un convertitore AC-DC che si occupa sia di caricare la bobina sia di mantenerne invariato il valore della corrente circolante in essa al più delle perdite resistive.

Al raggiungimento della carica ottimale, la bobina viene cortocircuitata da un semiconduttore (mantenuto anch'esso al di sotto della temperatura critica) e la corrente vi circola idealmente senza perdite. Nel momento in cui tale energia deve essere ceduta, si inverte il processo appena descritto facendo lavorare il medesimo convertitore da inverter in modo da trasferire parte dell'energia accumulata verso la rete. Questa tecnologia di accumulo dell'energia presenta efficienze molto elevate, oltre il 90%.

I sistemi SMES, essendo caratterizzati da alti livelli di efficienza e tempi di risposta molto brevi (uniti alla capacità di controllare la potenza attiva e reattiva) sono particolarmente adatti per applicazioni Power Intensive (applicazioni a funzionamento prevalente “in potenza”) cioè per interventi attinenti alla qualità dei servizi di rete (es. Power Quality). In campo industriale e privato ben si prestano per compensazioni di potenza reattiva (SVC<sup>4</sup>) e per il supporto in tensione di carichi privilegiati. Purtroppo, tale tecnologia è stata sperimentata solo in un ambito di ricerca, lontana da applicazioni concrete nell’ambito dell’accumulo energetico.

In Tabella 1.1 sono evidenziate le principali caratteristiche dei dispositivi SMES.

Tabella 1.1 - Parametri prestazionali degli SMES.

Parametro	Valore tipico
Potenza specifica [W/kg]	100000
Energia specifica [Wh/kg]	3
Capacità di immagazzinamento [MW]	<10
Tempi di risposta	ms÷s
Efficienza [%]	85÷95
Vita utile [anni]	20
Temperatura di lavoro [°C]	Insensibile alla temperatura esterna

I vantaggi sono:

- Elevata efficienza di conversione;
- Bassissimi tempi di intervento.

Gli svantaggi:

- Limite superiore di massima energia cumulabile nel campo magnetico a causa degli elevati sforzi elettrodinamici e volume richiesti;
- Complessità dovute al sistema di raffreddamento criogenico dei materiali superconduttivi;
- Elevato costo della tecnologia.

## 1.4 Supercondensatori

I sistemi elettrostatici accumulano energia elettrica sotto forma di carica elettrostatica in un condensatore, ovvero in un dispositivo composto da due elettrodi (solitamente piastre metalliche) separati da un opportuno dielettrico. Indicando con  $C$  la capacità del condensatore e  $V$  la tensione ad esso applicata, l’energia  $E$  immagazzinata è espressa dalla seguente formula:

$$E_e = \frac{1}{2} CV^2 \quad (1.3)$$

I cosiddetti supercondensatori (SC) consentono la massimizzazione della superficie disponibile per l’accumulo di cariche elettriche, utilizzando elettrodi composti da strati di carbonio oppure filamenti metallici la cui distanza è dell’ordine degli Angström ( $10^{-10}$ m). Applicando una differenza di potenziale ai terminali di un supercondensatore s’innesca un processo di separazione degli ioni dell’elettrolita che porta alla formazione di un doppio strato di carica alle interfacce elettrodo/elettrolita. L’accumulo di energia avviene molto rapidamente permettendo ai SC un numero di cicli di vita molto maggiore rispetto a quello degli accumulatori elettrochimici. La piccolissima distanza tra due elettrodi porta tuttavia a lavorare con intensi campi elettrici che possono raggiungere

<sup>4</sup> SVC: Static Var Compensation.

pericolosamente i valori di rigidità dielettrica del materiale dielettrico, ed è pertanto necessario limitare la tensione tra di essi e di conseguenza l'energia in essi immagazzinabile.

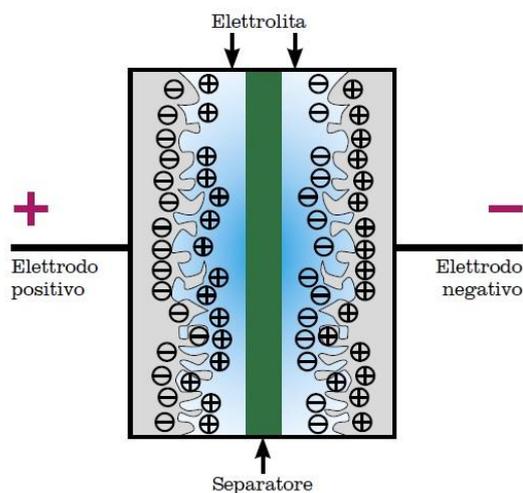


Figura 1.5 – Schema di principio del doppio strato di carica di un SC.

I supercondensatori sono ad oggi, assieme alle batterie agli ioni di litio, tra i dispositivi di accumulo di energia più studiati e sviluppati. Gli obiettivi sono quelli di aumentare i valori di densità di energia cumulabile e di ricercare nuovi materiali dielettrici che presentino valori di rigidità dielettrica maggiori, consentendo di lavorare a tensioni maggiori.

Tabella 1.2 - Parametri prestazionali dei SC.

Parametro	Valore tipico
Tensione nominale di cella [V]	1÷2.7
Capacità delle celle [F]	1÷5000
Potenza specifica [W/kg]	300÷10000
Energia specifica [Wh/kg]	1÷10
Efficienza energetica [%]	85÷98
Vita attesa [cicli]	500000÷1000000
Temperatura di lavoro [°C]	-40÷65
Ausiliari necessari	Sistema di bilanciamento

I supercondensatori possono essere classificati come dispositivi di “potenza”, cioè capaci di fornire in modo molto rapido elevati valori di potenza. Questa peculiarità li rende molto interessanti per le applicazioni nel campo della trazione elettrica in accoppiamento con altri tipi di accumulatori (es. elettrochimici) al fine di aumentarne le prestazioni in termini di potenza e di vita utile. Nelle applicazioni di tipo stazionario si prestano bene per compensazioni delle fluttuazioni di potenza presenti nella rete elettrica, per contribuire alla regolazione della tensione e per i servizi di Power Quality.

I SC hanno un costo specifico di 300-500 €/kW e, data l'elevata vita utile attesa, garantiscono un costo molto basso per ogni ciclo completo di carica-scarica se confrontati con i tradizionali sistemi di accumulo elettrochimico. Inoltre non presentano grossi problemi di impatto ambientale poiché i materiali costituenti non sono tossici.

In conclusione, i vantaggi della tecnologia sono:

- Tempi di risposta molto brevi;
- Elevati cicli di carica/scarica;
- Indipendenza delle proprietà elettriche dalla temperatura.

Come svantaggi vi sono:

- Elevata auto-scarica;
- Elevati costi dei componenti;
- Bassa densità di energia.

## 1.5 Batterie elettrochimiche

L'accumulo elettrochimico è attualmente la più diffusa forma di immagazzinamento dell'energia elettrica. Il principio di funzionamento consiste in una o più reazioni chimiche reversibili di ossidoriduzione, in cui una specie chimica si riduce cioè perde elettroni e un'altra si ossida, ovvero acquista gli elettroni persi dal riducente. Questo flusso di elettroni genera una corrente elettrica ed un potenziale che dipende dalle specie tra cui avviene la reazione.

Esistono numerose tipologie di accumulatori che si differenziano, oltre che per il tipo di elettrodi ed elettrolita, anche per le particolari condizioni di lavoro ottimali. Quelli che hanno avuto la maggiore diffusione e il più alto livello di maturità tecnologica e commerciale sono le batterie al piombo-acido. Esse trovano largo impiego in applicazioni stazionarie quali UPS<sup>5</sup>, alimentatori di emergenza in centrali e sottostazioni e nei trasporti come batterie per l'avviamento ed ausiliari.

L'accumulatore al nichel/cadmio è una delle tecnologie prime al mondo per volume di vendita, dopo quelle al piombo e litio, grazie alla particolare capacità di lavorare bene alle basse temperature mantenendo buone prestazioni ed un'elevata vita di utilizzo. La tecnologia è, purtroppo, in fase di declino per problemi politico-ambientali legati alla presenza del cadmio e viene sostituita quando possibile dall'accumulatore nichel/idruri metallici. Quest'ultima tecnologia comporta lo "svantaggio" dell'utilizzo di materie prime costose.

Le batterie ad alta temperatura che comprendono le sodio/zolfo e le sodio/cloruro di nichel, lavorano invece ad una temperatura interna di circa 300°C, necessaria per portare gli elettrodi allo stato fuso e per aumentare la conducibilità dell'elettrolita. Questa tipologia è caratterizzata da un'energia specifica molto più elevata rispetto agli accumulatori con elettrolita acquoso, elevati rendimenti energetici e prestazioni indipendenti dalla temperatura ambiente e che ben si adattano a condizioni climatiche estreme.

Le batterie a fluido o "flow batteries" sono capaci di accumulare energia elettrica in soluzioni elettrolitiche contenenti differenti coppie ossido-riducenti. Le soluzioni dell'elettrolita positivo e negativo sono immagazzinate in serbatoi, messi in circolazione da pompe e si interfacciano attraverso una membrana (separator) che permette lo scambio ionico, impedendo però il rimescolamento delle soluzioni (vedi Figura 1.6).

---

<sup>5</sup> UPS: Uninterruptible Power Supply: insieme di gruppi di continuità chiamati a sostenere carichi che devono essere alimentati anche in condizioni di emergenza.

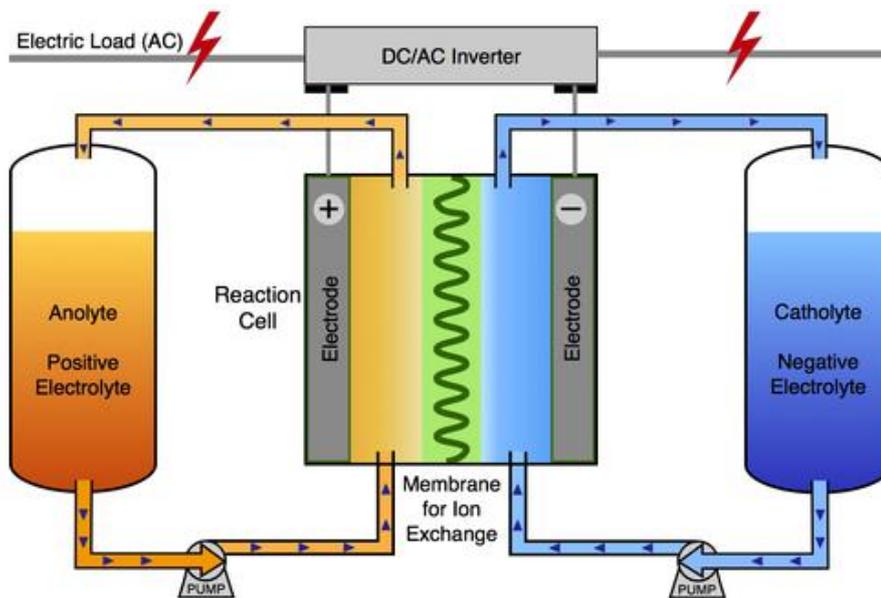


Figura 1.6 – Principio di funzionamento delle "Flow Batteries".

La caratteristica principale di questa tipologia di batterie è che la loro vita attesa è piuttosto lunga: per esempio, le Vanadio Redox possono superare i 10000 cicli di carica/scarica corrispondenti a oltre 20 anni di vita operativa.

Come ultimo tipo vi sono le batterie agli ioni di litio le quali sono ad oggi la più promettente tecnologia di accumulo elettrochimico e sono caratterizzate da ottime prestazioni in termini di energia e potenza specifica, elevato rendimento energetico, potenziale standard molto elevato (-3.04 V) e una capacità specifica molto alta (3.86 Ah/kg). Per questi motivi sono molto utilizzate nella trazione elettrica dove il peso e l'ingombro sono molto vincolanti. Nonostante ciò, questa tipologia di celle possono dare origine a situazioni di pericolo se sottoposte a condizioni di sovraccarico elettrico e/o termico perciò è necessario l'utilizzo di un sistema di bilanciamento delle tensioni di cella e di un BMS (Battery Management System) che monitori le grandezze di cella e dei moduli della batteria e intervenga in caso di condizioni di pericolo.

Una sintetica comparazione delle batterie appena descritte sono riportate in Tabella 1.3.

Tabella 1.3 - Comparazione batterie elettrochimiche.

<b>Tecnologia</b>	<b>Vantaggi</b>	<b>Svantaggi</b>	<b>Ricerca e sviluppo</b>
<b>Piombo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Economica</li> <li>○ Tecnicamente matura</li> <li>○ Materiale abbondante e riciclabile</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Vita attesa breve</li> <li>○ Bassa potenza ed energia specifica</li> <li>○ Produzione di idrogeno</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nuovi drogaggi che permettono un miglioramento delle prestazioni</li> </ul>
<b>Nichel/cadmio</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Buone prestazioni a basse e alte temperature</li> <li>○ Tecnicamente matura</li> <li>○ Sicurezza elevata</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Tossicità del cadmio</li> <li>○ Auto scarica elevata</li> <li>○ Produzione di idrogeno</li> <li>○ Rendimento energetico basso</li> <li>○ Effetto memoria</li> </ul>	
<b>Nichel/metal-idruri</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Potenza ed energia specifica elevate</li> <li>○ Sicurezza elevate</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Costo elevato</li> <li>○ Auto scarica elevata</li> <li>○ Rendimento energetico basso</li> <li>○ Effetto memoria</li> <li>○ Difficoltà di misurare il SOC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Riduzione dei costi</li> <li>○ Aumento della vita attesa</li> </ul>
<b>Sodio/ zolfo</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Potenza ed energia specifica elevate</li> <li>○ Rendimento energetico elevato</li> <li>○ Prestazioni indipendenti dalla temperatura</li> <li>○ Vita attesa lunga</li> <li>○ Abbondanza di materie prime poco costose</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Perdite energetiche per riscaldamento</li> <li>○ Necessità BMS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Riduzione dei costi</li> <li>○ Riduzione temperatura di lavoro</li> <li>○ Sicurezza</li> </ul>
<b>Sodio/cloruro di nichel</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Energia specifica elevata</li> <li>○ Rendimento energetico elevato</li> <li>○ Prestazioni indipendenti dalla temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Perdite per riscaldamento</li> <li>○ Potenza specifica bassa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Riduzione dei costi</li> <li>○ Aumento della potenza specifica</li> <li>○ Riduzione della temperatura di lavoro</li> <li>○ Sicurezza</li> </ul>
<b>Litio/ioni</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Alta energia e potenza specifica</li> <li>○ Rendimento energetico elevato</li> <li>○ Vita attesa lunga</li> <li>○ Minima manutenzione</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Necessità BMS</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Materiali elettrodi ed elettroliti meno costosi e più sicuri</li> </ul>
<b>VRB</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Vita attesa lunghissima</li> <li>○ Disaccoppiamento della potenza ed energia</li> <li>○ Scarica fino a tensione nulla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Onerosa manutenzione</li> <li>○ Rendimento energetico basso</li> <li>○ Sensibile alla temperatura</li> <li>○ Energia specifica bassa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>○ Nuove coppie Redox con maggiore energia specifica</li> <li>○ Riduzione costi</li> <li>○ Migliorarne la gestione</li> </ul>

Complessivamente, ciascun dispositivo elettrochimico presenta differenti vantaggi e svantaggi in termini di energia e potenza specifica, vita, costi e sicurezza, ma non esiste una tecnologia prevalente in assoluto sulle altre.

## 1.6 Riepilogo delle caratteristiche

A seguito di questa introduzione è possibile raggruppare sinteticamente le caratteristiche principali delle tecnologie appena viste, facilitandone il confronto e la scelta per una specifica applicazione e anticipando anche qualche peculiarità dei FES (vedi capitolo successivo).

Tabella 1.4 - Riassunto tecnologie di accumulo di energia.

<b>Tecnologia</b>	<b>Potenza nominale</b>	<b>Tempo di scarica</b>	<b>Tempo di risposta</b>	<b>Efficienza</b>	<b>Vita utile</b>
<b>PHES</b>	100-4000MW	6-24h	10s-3min	65-85%	30-75 anni
<b>CAES</b>	25-30000MW	4-24h	3-15min	50-85%	20-40 anni
<b>SMES</b>	1MW-100MW	1s-1min	5-10ms	85-95%	30-40 anni
<b>Supercondensatori</b>	10kW-1MW	1s-1min	5-10ms	85-95%	40 anni
<b>Batterie</b>	10kW-30MW	10min-8h	30-100ms	65-90%	2-10 anni
<b>FES</b>	10kW-20MW	1s-1h	5-10ms	85-95%	20 anni

## 2. Volani per l'accumulo di energia cinetica

---

I volani sono dei dispositivi il cui moto consente di immagazzinare energia sotto forma di energia cinetica rotazionale. Storicamente furono i primi sistemi che consentirono l'accumulo di energia meccanica. Il principio fu per primo applicato alla ruota del vasaio per la produzione di recipienti di ceramica di forma simmetrica, successivamente per movimentare la macina del grano per la produzione di farina [4]. All'inizio della rivoluzione industriale esplose la diffusione dei volani, diventando parte essenziale delle filande con la quale immagazzinare energia meccanica per utilizzarla poi in modo impulsivo dagli operatori. L'apice venne raggiunto quando le applicazioni volaniche furono applicate alle turbine a vapore e ai motori a combustione interna. Anche nei sistemi elettrici tale principio venne e viene tuttora utilizzato per smorzare i caratteri impulsivi della dinamica dei motori.

Il concetto di utilizzo dei volani come mezzo di accumulo dell'energia risale alla decade tra il 1960 e 1970. Successivamente, la nascita e l'evoluzione dei dispositivi di elettronica di potenza, hanno permesso il controllo della frequenza ovvero della velocità di rotazione della macchina elettrica, fino alla loro introduzione nei sistemi di trasporto e nei servizi della rete elettrica.

### 2.1 Principio di funzionamento

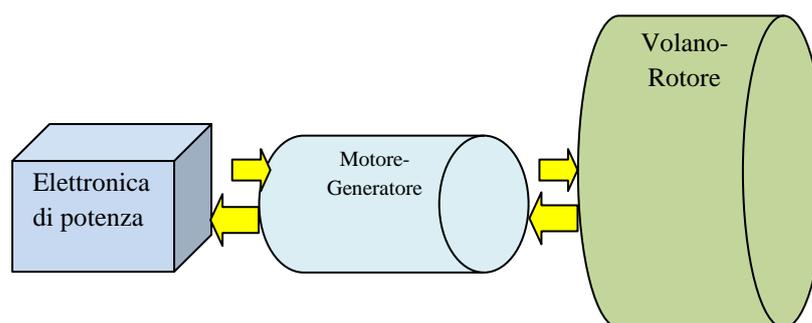


Figura 2.1 - Schema di principio dei flussi di potenza in un sistema FES.

I sistemi FES consentono di immagazzinare energia elettrica in energia cinetica  $E_k$  nei momenti di scarsa domanda da parte dell'utenza e rilasciarla nei momenti di maggior richiesta. Lo schema soprastante di Figura 2.1 mette in luce la suddivisione delle fasi principali dello sfruttamento della tecnologia dove, grazie all'elettronica di potenza, è garantita la bi direzionalità dei flussi di potenza.

$$E_k = \frac{1}{2} I \omega^2 \quad (2.1)$$

$$I = \int r^2 dm \quad (2.2)$$

$I$  momento d'inerzia;  $r$  distanza radiale dal centro del volano;  $\omega$  velocità angolare di rotazione.

L'elettronica di potenza gestisce la macchina elettrica in modo da accelerare e decelerare la massa rotante. Considerando un generico sistema di accumulo dell'energia, nell'ipotesi di velocità iniziale nulla, quando vi è un eccesso di produzione di energia da una fonte o, dualmente, una scarsa domanda da parte dell'utenza, il sistema di conversione fa sì che la macchina elettrica funzioni da motore aumentando la velocità di rotazione del volano (e dunque dell'energia accumulata).

Nel processo opposto la macchina elettrica funziona da generatore e la velocità del volano decresce, ergo eroga energia.

I principali aspetti dei volani per accumulo di energia sono:

- Elevata potenza specifica;
- Elevata densità di energia;
- Elevato numero di cicli di carica e scarica (superiore a 90000 cicli);
- Facile misura dello stato di carica (funzione della velocità);
- Costi di mantenimento contenuti;
- Elevata velocità di risposta;
- Assenza di barriere geologiche;
- Basso impatto ambientale;
- Tempo di vita superiore ai 20 anni.

I fattori chiave caratterizzanti la versatilità e le prestazioni dei volani sono le varie parti che lo costituiscono, come il materiale, la geometria, la macchina elettrica ad esso accoppiata, l'ambiente di lavoro, ecc. Nel seguito, ciascuna di queste sarà trattata più nel dettaglio.

## 2.2 Materiali

A parità d'ingombro geometrico, per massimizzare l'energia accumulabile in un volano (2.1) è necessario aumentarne il momento d'inerzia e dunque la massa rotante oppure aumentare la velocità di rotazione angolare. La prima scelta giustifica l'utilizzo di materiali ad elevato peso specifico e relativamente poco costosi, come gli acciai. La seconda scelta è invece giustificata dal fatto che l'energia aumenta con il quadrato della velocità  $e$ , a sua volta, la velocità angolare massima che il volano può raggiungere è determinata dalla capacità del materiale di resistere alle forze centrifughe agenti nella struttura interna. A tal proposito vi è la necessità di utilizzare materiali con tensioni interne molto elevate: è il caso dei materiali in fibre composite a bassa densità. Di seguito sono riportati in Tabella 2.1 i parametri fisici dei materiali utilizzati per i volani.

Data la densità del materiale  $\rho$ , la massima tensione interna del materiale  $\sigma_m$  e il fattore di forma  $K$ , l'energia specifica è data da

$$e_{sp} = \frac{K\sigma_m}{\rho} \quad (2.3)$$

Tabella 2.1 - Parametri fisici dei materiali ( $K = 0.5$ ).

Materiali	Densità [kg/m <sup>3</sup> ]	Tensioni interne [GPa]	Energia specifica [Wh/kg]
<b>Acciaio</b>			
<b>4320</b>	7700	1.52	50
<b>AISI 4340</b>	7800	1.80	64
<b>Leghe</b>			
<b>AlMnMg</b>	2700	0.60	62
<b>Titanio</b>			
<b>TiAl6Zr</b>	4500	1.20	74
<b>Compositi</b>			
<b>E-glass</b>	200	0.10	14
<b>S-glass</b>	1920	1.4	210
<b>Carbonio T-1000</b>	1520	1.95	350
<b>Carbonio (alte prestazioni)</b>	1780	10	780

Sulla base di ciò, i volani possono essere classificati in due classi: la classe dei volani operanti ad alte velocità costituiti per lo più da materiali come fibre composite (fibra di carbonio) e la classe di quelli rotanti a bassa velocità la quale ingloba i volani in acciaio, più pesanti, meno performanti ma decisamente molto meno costosi. Relativamente all'aspetto sicurezza però, i volani in fibra composita sono più sicuri nelle situazioni di emergenza dal momento che se la velocità eccede il valore massimo sostenibile dal materiale, questo si disintegra gradualmente a partire dall'estremità radiale invece che esplodere catastroficamente in pezzi richiedendo quindi una struttura di contenimento adeguatamente dimensionata.

### 2.3 Geometria

Nel paragrafo precedente è stato introdotto il fattore di forma  $K$  come fattore correttivo dell'energia specifica. Esso infatti è un indice di quanto efficientemente è utilizzato un certo materiale costituente il volano. Banale è ribadire che lo scopo principale di un sistema di questo tipo è quello di massimizzare le performance d'accumulo. Di seguito sono riportati i più comuni fattori di forma.

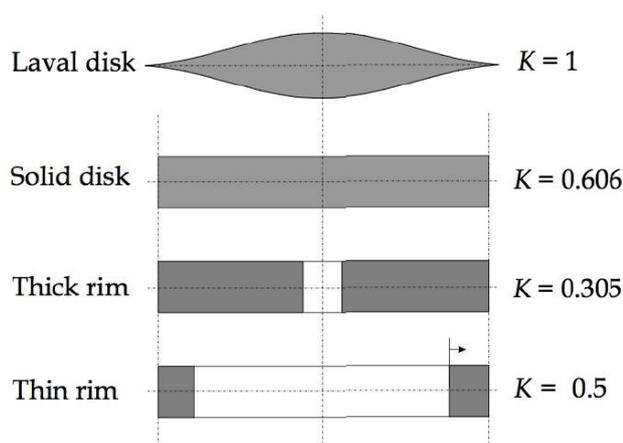


Figura 2.2 – Principali fattori di forma [5].

Si prenda a titolo esemplificativo il disco di Laval, dal nome dell'ingegnere svedese Gustav de Laval, avente fattore di forma unitario. La sua particolarità è data dal fatto che gli stress radiali e tangenziali del materiale rimangono costanti in ogni volumetto infinitesimo costituente il pezzo, grazie alla particolare disposizione geometrico-strutturale del materiale. Generalmente si può dire che il fattore  $K$  dipende dal tipo di materiale utilizzato: materiali isotropi come l'acciaio, presentano tensioni (o stress) interne costanti sia lungo la direzione radiale che tangenziale rispetto al moto di rotazione; materiali anisotropi come la fibra di carbonio, presentano tensioni radiali molto più intense (e dunque rafforzate) rispetto a quelle tangenziali.

### 2.4 Accoppiamento elettromeccanico

L'accumulo di energia nei volani è reso possibile grazie all'accoppiamento con una macchina elettrica che consente di accelerare e decelerare la massa rotante, ragione per cui deve poter lavorare sia come motore che da generatore. Quando la macchina elettrica accelera (motore), l'energia accumulata aumenta, mentre se deve erogare all'utenza, il volano decelera e la macchina lavora da generatore. La scelta della tipologia di macchina elettrica da utilizzare è relazionata ai valori di efficienza di conversione elettromeccanica e di densità di potenza che si vuole ottenere.

Le più comuni sono: macchine asincrone (IM<sup>6</sup>), sincrone a magneti permanenti (PMSM<sup>7</sup>) e a riluttanza (VRM<sup>8</sup>).

La macchina asincrona è la più utilizzata per applicazioni ad alta potenza (e basse velocità) grazie alla semplicità della struttura, elevata coppia e basso costo. È inoltre preferita la configurazione a doppia alimentazione per ridurre il dimensionamento dell'elettronica di potenza di gestione della macchina e funzionando prevalentemente a basse velocità, non vi sono particolari problemi in merito alle sollecitazioni sugli avvolgimenti di rotore e alla presenza delle spazzole di connessione.

L'accoppiamento tramite PMSM prevarica le tipologie citate sopra per l'elevata efficienza e sono dunque preferite per il funzionamento ad elevate velocità. Non avendo perdite nel rotore (presenza magneti permanenti) meglio si presta al funzionamento in ambiente "vuoto" dove altrimenti le perdite Joule (calore) sono difficilmente asportabili. Rimane comunque, per esempio, il problema della smagnetizzazione dei magneti dovute a possibili incrementi di temperatura. Sfruttando la particolare configurazione Halbach dei magneti è anche possibile eliminare totalmente le perdite nel ferro a scapito di minore flusso e minore potenza. Tutto ciò, sfortunatamente, non contribuisce a contenere i costi.

La tipologia di macchina a riluttanza variabile presenta invece un rotore privo sia di magneti che di avvolgimenti e per questo ben si presta per applicazioni ad altissima velocità. Nel complesso possiede caratteristiche intermedie a quanto detto per le IM e PMSM, conferendo un elevato intervallo di variazione di velocità sfruttabile a basso costo.

Le caratteristiche principali sono sintetizzate nella Tabella 2.2.

Tabella 2.2 - Caratteristiche principali macchine elettriche ad uso FES.

Macchina	IM	VRM	PMSM
<b>Potenza</b>	alta	Medio/bassa	Medio/bassa
<b>Potenza specifica [kW/kg]</b>	0.7	0.7	12
<b>Efficienza [%]</b>	93.4	93	95.2
<b>Rapporto velocità massima/base</b>	>3	>4	<2
<b>Smagnetizzazione</b>	No	No	Si
<b>Costo</b>	Basso	Basso	Alto

## 2.5 Cuscinetti

Rotore e volano sono posti in rotazione e fanno parte di una struttura unica inglobata nell'albero principale. Tra albero e struttura esterna della macchina, vi sono necessariamente uno o più cuscinetti che consentono di ridurre al minimo gli attriti tra i due corpi. Con l'avvento dei volani operanti ad elevate velocità, le perdite dovute all'attrito sono sempre più vincolanti se si vogliono mantenere rendimenti di conversione elevati e ridurre i costi di mantenimento e manutenzione. In generale, il problema principale dei cuscinetti non sono tanto gli stress a cui sono sottoposti ma il lubrificante. I parametri principali di confronto tra le diverse tipologie di cuscinetti sono dunque il peso, le perdite, il costo e i cicli di vita.

<sup>6</sup> IM: Induction Motor.

<sup>7</sup> PMSM: Permanent Magnet Synchronous Machine.

<sup>8</sup> VRM: Variable Reluctance Machine.

Nel seguito di questa sezione saranno brevemente introdotti le tue tipologie di cuscinetti, meccanici e magnetici, il cui sviluppo dell'ultimo citato sarà oggetto di approfondimento nel capitolo successivo.

I tradizionali cuscinetti meccanici sono potenzialmente più adatti per lavorare a basse velocità (2000÷40000 rpm) ed offrono ottime prestazioni a basso costo iniziale d'investimento ma necessitano sempre elevate quantità di lubrificante per asportare il calore dovuto agli attriti.

I cuscinetti magnetici invece non prevedono il contatto tra l'albero e il sistema di appoggio del sistema, eliminando così totalmente l'uso di lubrificanti, dunque minore costo e perdite dovute all'attrito. Per tale motivo ad essi è associata una lunga durata di vita e l'ottima predisposizione all'utilizzo per applicazioni ad elevate velocità. Dal punto di vista strutturale, un cuscinetto magnetico è generalmente composto da un magnete permanente che fa levitare la massa rotante ed un elettromagnete avente la funzione di controllare e stabilizzare il moto.

Esistono e sono tuttora molto studiati molteplici configurazioni di cuscinetti magnetici diversi tra loro: i più sofisticati utilizzano materiali superconduttivi (HTS<sup>9</sup>), i cui materiali, come accennato già in precedenza, sono particolarmente costosi e necessitano di sistemi criogenici per mantenerli al di sotto della temperatura critica.

## 2.6 Involucro

Per "involucro" si intende l'ambiente di lavoro circostante il volano e la struttura di contenimento. Normalmente si fa riferimento all'aria, dunque ad una miscela di gas a pressione atmosferica. Gli attriti dovuti alla resistenza del fluido circostante (attriti aerodinamici) sono molto rilevanti e devono essere minimizzati. Una soluzione per ridurre tali perdite è quella di lavorare in ambiente con gas a bassa pressione (mix di elio e aria) o in "vuoto". Quest'ultimo però complica il layout del sistema e richiede pompe e sistemi di raffreddamento ausiliari in quanto si complica l'estrazione del calore dissipato dagli avvolgimenti e dell'eventuale lubrificazione di cuscinetti (se sono presenti quelli di tipo meccanico).

Non da meno è l'aspetto "sicurezza" del sistema di contenimento. Esso deve essere tale da resistere agli impatti di pezzi di volano nel caso in cui si disintegri a causa del raggiungimento dell'eccessiva velocità e di proteggere principalmente gli operatori e le apparecchiature circostanti. A tale fine le pareti dell'involucro sono dimensionate in funzione al materiale cui è composto il volano (fibre composite o acciaio). In alcuni casi, per garantire il massimo livello di sicurezza, si può ricorrere ad alloggiamento interrato.

---

<sup>9</sup> HTS: High Temperature Super-conducting magnetic bearing.



Figura 2.3 – Alloggiamento interrato del Volano [6].

## 2.7 Elettronica di potenza

I recenti progressi nell'ambito dell'elettronica di potenza hanno fatto sì che i volani siano sempre più competitivi nelle applicazioni di accumulo dell'energia. Nuovi sviluppi inerenti gli interruttori (MOSFET, IGBT, ecc.) hanno consentito l'incremento delle frequenze di lavoro e delle potenze di scambio. Generalmente la configurazione prevede un doppio stadio di conversione AC-DC-AC bidirezionale ai flussi di potenza. Lo stadio in continua consente di collegare due sistemi operanti a frequenze diverse e temporalmente variabili. Il primo stadio AC-DC collega la macchina elettrica al convertitore, il cui controllo è finalizzato all'inseguimento del punto di lavoro ottimale della suddetta. L'altro stadio DC-AC, consente invece il trasferimento della potenza in un sistema a frequenza costante (la rete).

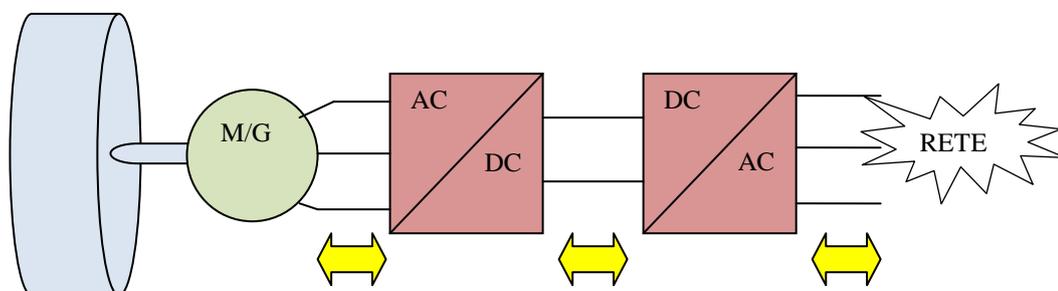


Figura 2.4 - Schema di principio del flusso di potenza.

## 2.8 Caratteristiche generali

In merito all'architettura della tecnologia dei volani è il caso di fare qualche considerazione. Per prima cosa, l'energia accumulata è strettamente dipendente dalla massa e della velocità del volano ma la potenza di dimensionamento è legata e limitata dalle caratteristiche della macchina elettrica e dell'elettronica di potenza. Pertanto, diversamente dalle batterie elettrochimiche, l'energia e la potenza dei volani sono quasi indipendenti l'una dall'altra ma, solitamente, sono dimensionati per massimizzare al contempo energia e potenza. In definitiva, le principali scelte ed associazioni tra i componenti fin qui descritti, sono riassunti nella Tabella 2.3, dove si distinguono le due macro tecnologie di applicazioni a bassa ed alta velocità.

Tabella 2.3 - Principale distinzione tra applicazioni a bassa ed alta velocità.

	FES bassa velocità	FES alta velocità
<b>Materiale</b>	Acciaio	Materiali compositi
<b>Macchina elettrica</b>	Asincrona	Sincrona a magneti permanenti
<b>Atmosfera di lavoro</b>	Gas bassa pressione	Vuoto
<b>Involucro</b>	Interrato	Rinforzato
<b>Cuscinetti</b>	Meccanici o mix	Magnetici
<b>Principale applicazione</b>	Power Quality	Trazione, Industria aerospaziale
<b>Costo relativo</b>	1	5

## 2.9 Principali applicazioni

La maggior parte delle tecnologie FES è applicata ai servizi non interrompibili UPS e a quelli di Power Quality perché sono molto più affidabili delle tradizionali batterie al piombo-acido e perché garantiscono tempi di intervento molto brevi. Spesso sono utilizzate anche per compensare le oscillazioni di potenza derivanti da fonti rinnovabili come nel caso di associazione con fonti di energia eolica e solare (Figura 2.5).

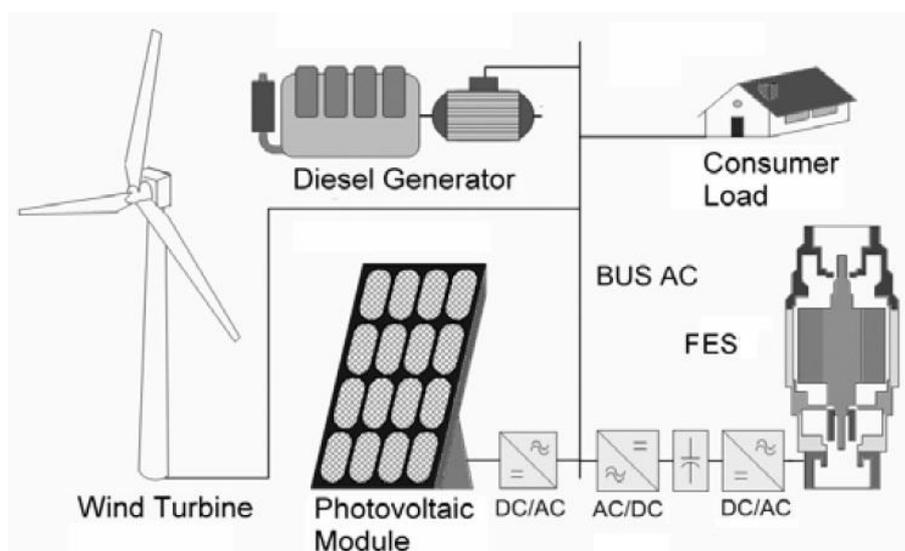


Figura 2.5 - Integrazione FES con fonti rinnovabili.

Per quanto riguarda le applicazioni nel campo della mobilità, i sistemi FES sono forte oggetto di ricerca, in quanto hanno capacità di accumulo comparabili con le più utilizzate batterie elettrochimiche. I volani, però sono addirittura potenzialmente più performanti in termini di ampiezza di scarica e cicli di carica-scarica. Unico difetto: il costo iniziale. Le due suddette tecnologie sono caratteristicamente comparabili tra loro se non addirittura risultino globalmente più versatili i sistemi FES anche dal punto di vista dei costi totali nell'intera vita di utilizzo (costo fisso più i costi di manutenzione) [7]. Parimenti a quanto sviluppato sin ora in termini di veicolo ibrido (motore a combustione interna e motore elettrico più batterie), esistono sistemi integrati in veicolo in cui il dimensionamento del propulsore principale (motore a combustione interna) è calcolato sulla base della potenza media da erogare (lavora nel punto di massima efficienza) mentre la batteria è sostituita dal volano il quale è dimensionato per compensare le fluttuazioni di potenza nelle fasi di accelerazione e decelerazione [8-9]. Inevitabile conseguenza è una sensibile riduzione dei consumi di carburante, di rumori e di inquinamento.

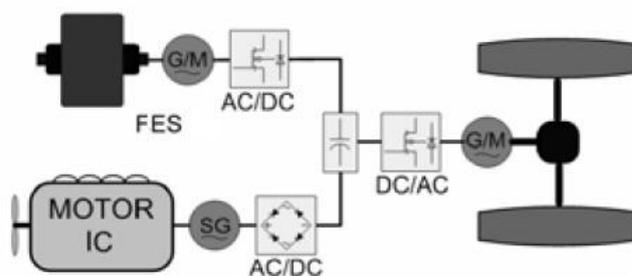


Figura 2.6 – Componenti di un veicolo ibrido con tecnologia FES.

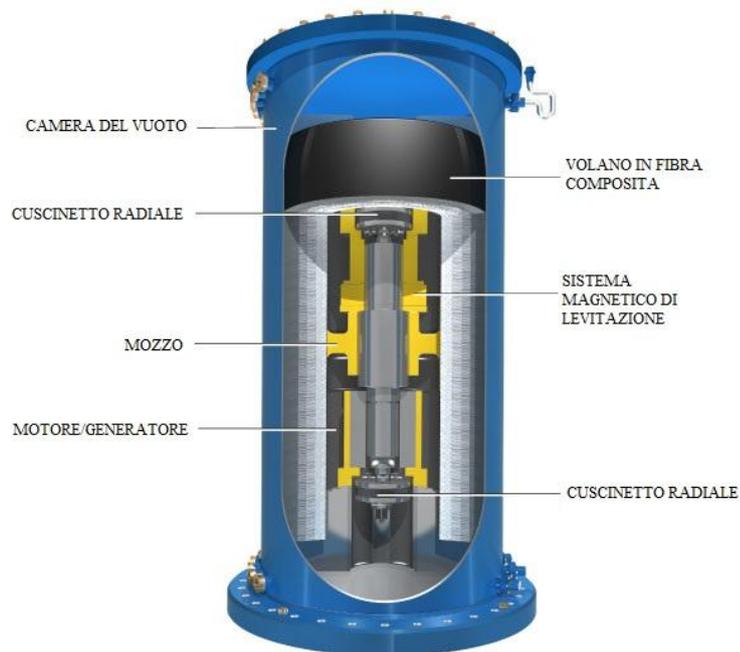
La situazione intermedia tra volani stazionari o volani in veicolo, vi è l'utilizzo in associazione con la linea di alimentazione dei treni e delle metropolitane aventi lo scopo di assorbire l'energia recuperata in frenata dai veicoli e di rilasciarla durante le accelerazioni degli stessi. Questi sistemi consentirebbero di dimensionare i volani solo per il massimo intervallo di oscillazione di potenza (e non per la totale potenza di dimensionamento) e garantire sicuramente un più efficiente utilizzo dell'energia senza più il bisogno di dissiparla in resistori. Inoltre si possono mantenere sottostazioni non bidirezionali al flusso di potenza (semplificazione).

Ad oggi, i più grandi produttori mondiali di volani per accumulo dell'energia sono riportati nella Tabella 2.4 in cui sono riportate anche alcune caratteristiche del loro prodotto [10].

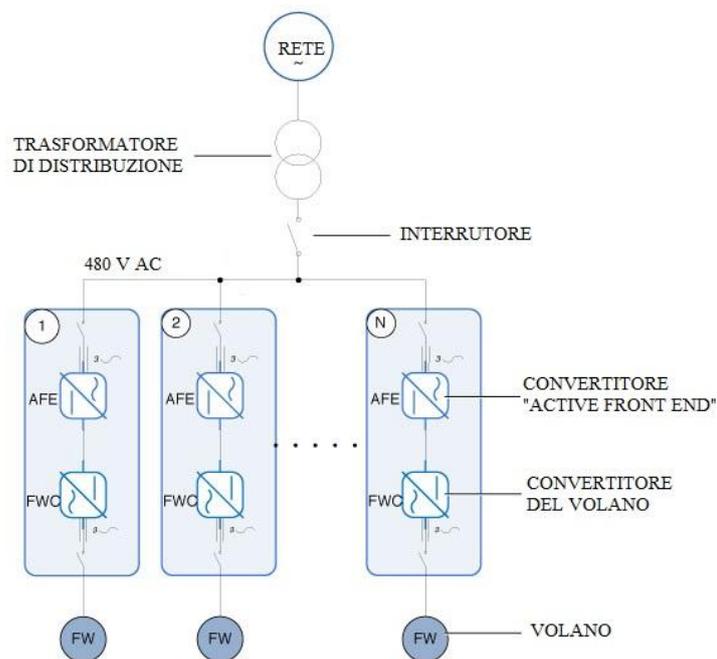
Tabella 2.4 – Principali prodotti e produttori di volani per accumulo di energia.

Produttore	Nome del prodotto	Tipo di rotore	Velocità in standby [rpm]	Involucro	Tipo di cuscinetti
<b>Active Power</b>	CleanSource	Acciaio	7700	Vuoto parziale	Magnetici e meccanici
<b>Piller</b>	Powerbridge	Acciaio	3600	Elio	Magnetici e meccanici
<b>Hitec(formalmente Holec)</b>	Continuos Power Supply (CPS)	Acciaio	3600	Aria	Meccanici
<b>SatCon</b>	Starsine Rotary UPS	Acciaio	1800	Aria	Meccanici
<b>AFS Trinity</b>	M3A	Grafite composita	40800	Vuoto	Magnetici attivi
<b>Pentadyne</b>	VSS 120	Grafite composita	55000	Vuoto	Magnetici attivi
<b>Ureco Power Technologies</b>	Tr200	Grafite composita	36000	Vuoto	Magnetici
<b>Beacon Power</b>	SmartEnergy BHE-6	Grafite composita	22500	Vuoto	Magnetici attivi

Produttore	Potenza	Tempo di scarica	Tempo di ricarica	Perdite in standby
<b>Active Power</b>	250 kW <sub>dc</sub>	13.5 s	2.5 min-60 kW <sub>dc</sub>	0.76%
<b>Piller</b>	1100 kW <sub>dc</sub>	15 s	60 s	4.5%
<b>Hitec(formalmente Holec)</b>	275-2000 kVA	10 s	10 s	2.5%
<b>SatCon</b>	315-2200 kVA	12 s	12 s	2.3%
<b>AFS Trinity</b>	100 kW <sub>dc</sub>	15 s	15 s	0.70%
<b>Pentadyne</b>	120 kW <sub>dc</sub>	20 s	20 s	0.10%
<b>Ureco Power Technologies</b>	250 kW <sub>dc</sub>	30 s	30 s	0.28%
<b>Beacon Power</b>	2 kW <sub>dc</sub>	3 h	2.5 h-4kW <sub>dc</sub>	3.5%



a)



b)

Figura 2.7 – a) Volano per l'accumulo di energia; b) Schema elettrica di un'applicazione fissa.

In Figura 2.7 è mostrato il prodotto di punto dell'azienda Beacon Power e dello schema elettrico di un'applicazione a 480 V di un parco di accumulo a volano realizzato dalla suddetta.

Le Figure 2.8 e 2.9 mostrano invece altri volani per accumulo di energia, di altri due diversi produttori.

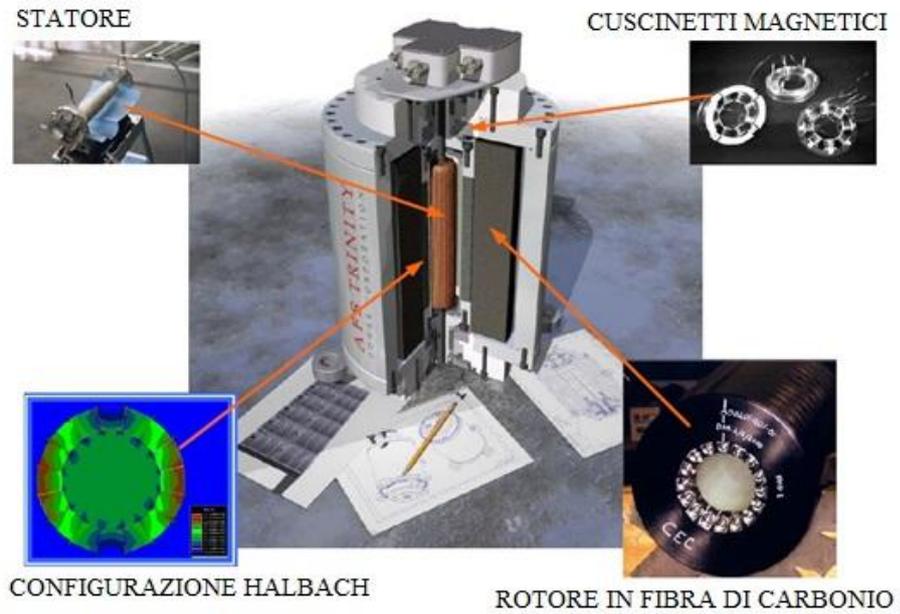


Figura 2.8 – Sistema di accumulo di energia prodotto da “AFS Trinity” [11].

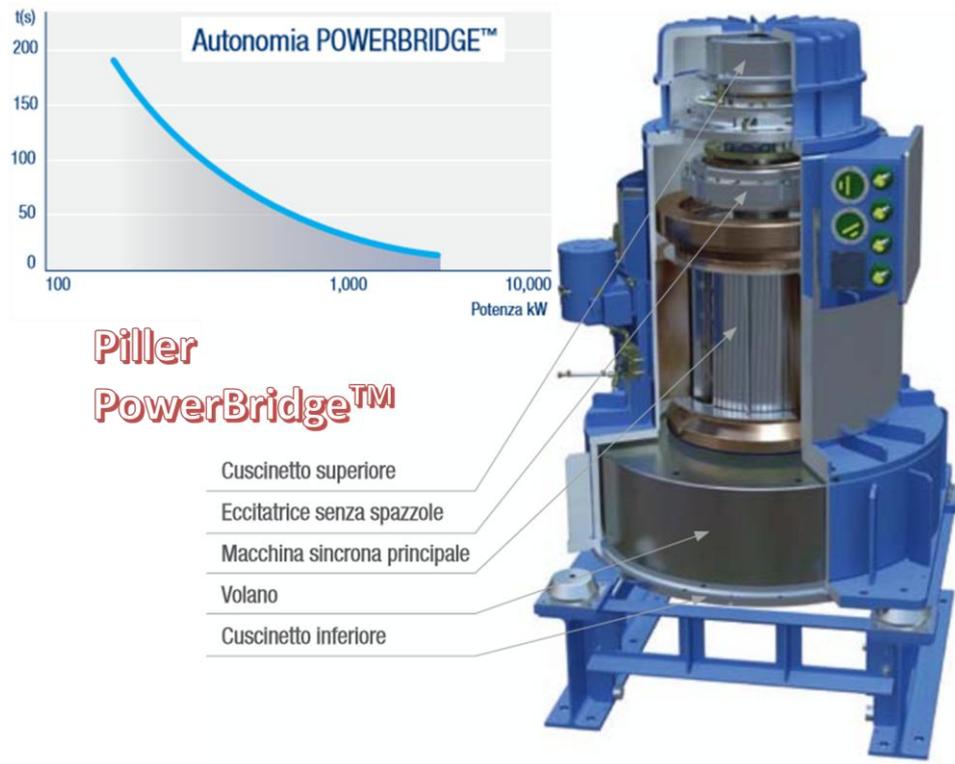


Figura 2.9 – Sistema di accumulo di energia prodotto da “Piller” [12].



### 3. Cuscinetti magnetici

---

Trascorsi venticinque anni dalla prima applicazione commerciale, i cuscinetti magnetici si sono largamente diffusi soprattutto nelle applicazioni ad elevate velocità grazie ai numerosi vantaggi rispetto i classici cuscinetti meccanici. Le prime applicazioni trovarono approdo in turbine e pompe in impianti industriali (ad esempio in impianti a turbogas) dove l'elevata velocità, gli attriti e i problemi di lubrificazione erano e sono tuttora elementi critici di inaffidabilità [13].

Il progresso tecnologico e in particolare l'elettronica di potenza, hanno consentito alle macchine elettriche convenzionali di lavorare a velocità superiori di quella nominale, senza variarne la configurazione interna (nota: si pensi che il sistema rotante più veloce fin ora costruito risale al 1937 per opera di Beams e Holmes dell'Università della Virginia: consistette nella sospensione elettromagnetica di sferette di acciaio le quali ruotarono alla sorprendente velocità di 18 milioni di giri al minuto, al punto di fonderle istantaneamente a causa delle forze centrifughe [14-15]).

In merito al bisogno di progettare sistemi che lavorano sempre più a velocità elevate, ci si trova di fronte ad alcune problematiche non più trascurabili, quali l'aerodinamica e i relativi attriti, problemi di vibrazioni e di controllo della reale dinamica della macchina e l'affidabilità del cuscinetto. Ad elevate velocità, la durata dei cuscinetti meccanici a sfera è molto limitata date le difficoltà di mantenerli ben lubrificati (per dissipare il calore dovuto all'attrito) o per la realizzazione dell'ambiente di lavoro a pressione nulla. Un altro problema, sempre ad alte velocità, è quello del rumore generato dai tradizionali cuscinetti a sfera, dovuto a sbilanciamenti del rotore o dell'albero, i quali possono portare all'insorgere di cricche strutturali.

Una prima miglioria è stato fatta introducendo sfere di tipo ceramico a bassa densità anziché di acciaio, allo scopo di ridurre l'entità delle forze centrifughe. Ciò non portò ad enormi progressi dal momento che le forze aumentano linearmente con il peso e col quadrato della velocità. Dunque il passo successivo è stato quello di ridurre il diametro dei cuscinetti riducendo di conseguenza la loro velocità periferica. Così facendo però, la coppia all'albero non veniva ridotta. Inoltre l'applicazione delle medesime coppie su alberi più sottili risultava del tutto controproducente. Ciò ha dato vita al crescente sviluppo ed interesse verso i cuscinetti cosiddetti "free-contact", di tipo magnetico.

La tecnologia applicata alla sospensione magnetica di corpi rotanti è cresciuta enormemente da poche decine d'anni grazie ai processi informatici sempre più avanzati e ai progressi nell'ambito dei controlli (oltre che all'elettronica di potenza).

In generale, l'uso di cuscinetti magnetici comporta numerosissimi vantaggi, tra cui:

- L'eliminazione di oli lubrificanti con conseguente riduzione dei costi, della potenza consumata e delle manutenzioni;
- Riduzione di rumori di disturbo;
- Basse perdite di energia;
- Bassa rigidità con vantaggi nelle operazioni a velocità variabile dal momento che le vibrazioni sono minimizzate dai controlli attivi (dinamica migliore);
- Utilizzo di attuatori e sensori affidabili.
- Bassissimo "life cycle cost";
- Assenza di contatto tra le parti in movimento;
- Benefici in termini di sicurezza (nessun rischio d'incendio legato all'utilizzo di oli ad alta pressione).

È di forte auspicio che il costo iniziale d'investimento di questa tecnologia diminuisca decisamente grazie al continuo ed inarrestabile processo di maturazione e diffusione che sta suscitando.

Al giorno d'oggi i cuscinetti magnetici sono impiegati in moltissime applicazioni. La domanda che ci si può porre è: che tipo di cuscinetto magnetico o quale combinazione di cuscinetti è possibile utilizzare per soddisfare appieno determinate esigenze meccaniche preservandone l'economicità? Ovviamente non vi è risposta certa. Nella maggior parte delle applicazioni si utilizzano combinazioni di cuscinetti meccanici e magnetici, in altre si sfruttano combinazioni di diversi tipi di cuscinetti magnetici (per esempio passivi e attivi). Resta comunque il fatto che ogni applicazione è a sé stante e va studiata la soluzione più appropriata al contesto.

È comunque necessario sottolineare che dovranno comunque essere presenti dei cuscinetti meccanici per situazioni di emergenza od di malfunzionamento di quelli magnetici.

### 3.1 Cenni storici e teorici

Già nel 1842 Earnshaw [16] fu capace di dimostrare l'impossibilità di un oggetto di rimanere stabilmente sospeso in aria grazie alle sole forze magnetiche e di gravità. Sia  $V$  lo scalare del potenziale vettore magnetico in un punto, proporzionale al prodotto scalare tra il vettore induzione  $\vec{B}$  nel punto e la magnetizzazione  $\vec{m}$ . Secondo Laplace la somma delle derivate parziali è nulla

$$\frac{d^2V}{dx^2} + \frac{d^2V}{dy^2} + \frac{d^2V}{dz^2} = 0 \quad (3.1)$$

Affinché sia raggiunta la stabilità vale che:

$$\frac{dV}{dx} = \frac{dV}{dy} = \frac{dV}{dz} = 0 \quad (3.2)$$

Le equazioni sopra mostrano che la condizione di massimo o minimo del potenziale  $V$ , esiste e ne garantisce la stabilità solo nel punto di minimo. La condizione per cui il potenziale è minimo è che la somma delle derivate seconde sia nulla (3.1). Nel migliore dei casi, due derivate su tre sono positive, l'altra è sicuramente negativa: lungo questa direzione l'equilibrio è instabile. Al fine di rendere il sistema stabile in tutte le direzioni, è opportuno aggiungere un termine dinamico che può essere di tipo elettromagnetico (è il caso di cuscinetti magnetici attivi) o meccanico (vincolo strutturale o un cuscinetto a sfere).

### 3.2 Classificazione dei cuscinetti magnetici

In letteratura si possono trovare numerose tipologie di dispositivi che generano campi tali da porre in sospensione un certo corpo senza che vi sia contatto fisico tra i due. Una tra le tante classificazioni divide i cuscinetti in due macro tipologie a seconda del fenomeno fisico di generazione delle forze di levitazione [17], mostrate dai diagrammi che seguono.

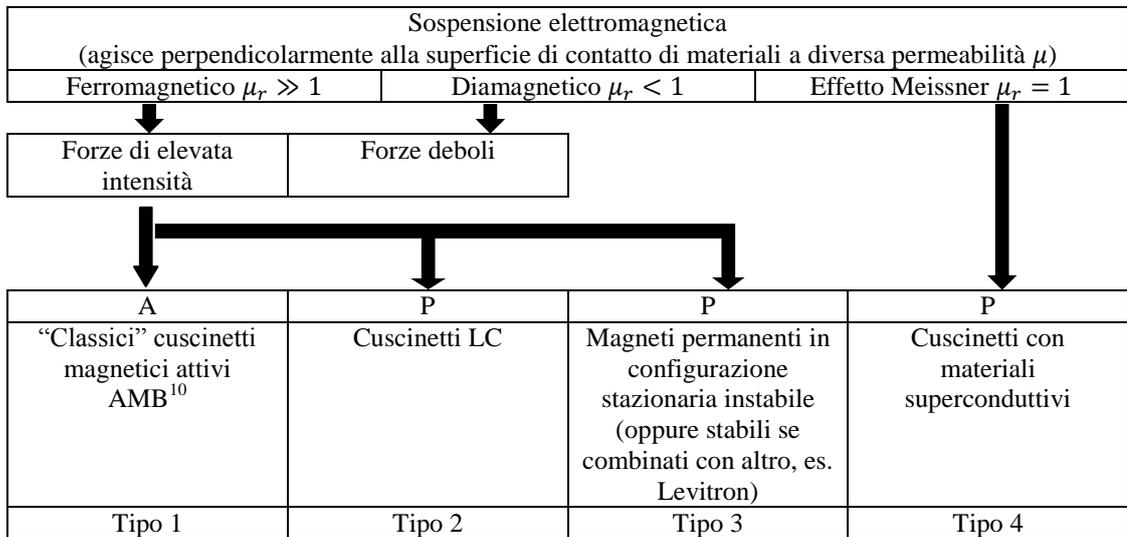


Figura 3.1 – Classificazione cuscinetti magnetici che sfruttano forze elettromagnetiche.

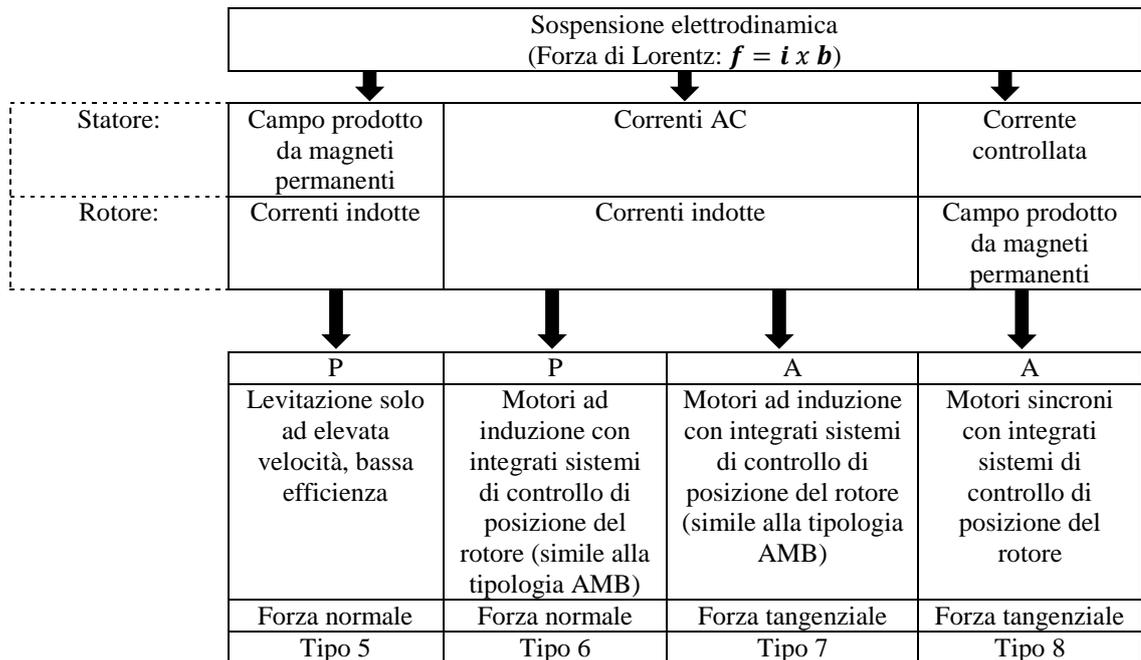


Figura 3.2 – Classificazione cuscinetti magnetici che sfruttano forze elettrodinamiche.

L'abbreviazione A indica che il tipo di cuscinetto è “stabile solo con controllo attivo”, P “stabile senza controllo”. Per quelli che sfruttano le forze di Lorentz, le indicazioni “normal” e “tangential” fanno riferimento alla direzione d'azione della forza magnetica rispetto il traferro.

<sup>10</sup> AMB: Active Magnetic Bearing.

### 3.2.1 Sospensione elettromagnetica

Si faccia riferimento alla Figura 3.1. La forza di riluttanza nasce nel momento in cui il campo magnetico che attraversano un materiale ferromagnetico, avente una certa permeabilità  $\mu = \mu_r \mu_0$  ( $\mu_r$  permeabilità magnetica relativa dipendente dal materiale,  $\mu_0$  permeabilità magnetica a vuoto) incontra un altro materiale a diversa permeabilità magnetica. Tale forza deriva dal “principio dei lavori virtuali” ed è così definita:

$$\bar{f} = \frac{\partial W}{\partial \bar{s}} \quad (3.3)$$

Con  $W$  energia e  $s$  lo spostamento “virtuale” del corpo rispetto alla parte fissa. La direzione di  $f$  è normale alla superficie che si interfaccia tra i due materiali. Maggiore è la differenza tra le permeabilità e maggiore sarà la forza esplicita. L’attraversamento del campo magnetico nei materiali magneto-conduttori non avviene a resistenza nulla: la resistenza magnetica di un materiale va sotto il nome di riluttanza ed è definita dalla relazione (3.4).

$$\mathcal{R} = \frac{\mu s}{A} \quad (3.4)$$

$A$  area della superficie d’interfaccia normale al flusso;  $s$  lunghezza del tubo di flusso.

In generale la forza agisce in modo tale da diminuire la riluttanza del circuito magnetico fino a minimizzarne l’energia. Di seguito verranno descritte più nel dettaglio i tipi 1, 3 e 4 della Figura 3.1. Molto spesso nelle applicazioni industriali è necessario monitorare e controllare istantaneamente lo stato del sistema per soddisfare particolari condizioni di lavoro. A tale proposito si utilizzano i cuscinetti AMB classificati come di Tipo 1.

- Tipo 1. Un cuscinetto magnetico attivo è formato da un elettromagnete (bobina) capace di generare un certo campo magnetico e dunque una certa forza al traferro controllabile mediante un sistema di controllo retroattivo (Figura 3.3). Dalle informazioni derivanti da sensori di posizione, ogni deviazione dalla posizione teorica di equilibrio si traduce in un segnale che, amplificato, cambia opportunamente il valore della corrente dell’elettromagnete.

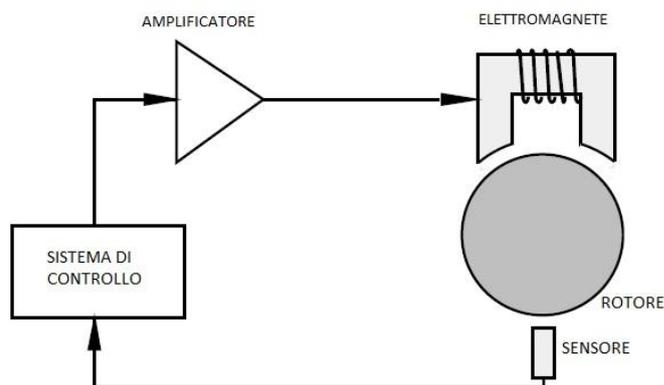


Figura 3.3 – Schema di principio AMB [18].

In letteratura si parla sempre di forza di “attrazione” generata da un elettromagnete ma, teoricamente, quanto detto vale anche nel caso le forze siano repulsive.

L'ambito in cui si utilizzano moltissimo i sistemi elettromagnetici controllati in modo attivo è quello meccatronico. Il principale vantaggio rispetto i cuscinetti PMB<sup>11</sup> è quello di poter adattare l'algoritmo di controllo alla dinamica della macchina. Contrariamente vi è il costo e la spesa di energia richiesta dal sistema di controllo stesso.

- Tipo 3 (PMB). Quando si fa riferimento ai cuscinetti magnetici passivi, si intendono quelli composti da soli magneti permanenti. In configurazione stazionaria la stabilità levitante non è acquisibile, in accordo con quanto spiegato da Earnshaw. Per rendere il sistema stabile occorrono forze giroscopiche addizionali, come nel caso del Levitron<sup>12</sup>. L'utilizzo di questo tipo di cuscinetto per la sospensione di un corpo va a favore del risparmio di energia rispetto i tradizionali cuscinetti AMB e permette la stabilizzazione in almeno in un grado di libertà del sistema. Spesse volte, per quanto appena affermato, sono utilizzati in accoppiamento con i suddetti AMB in modo da inglobare i vantaggi dell'uno e dell'altro tipo.
- Tipo 4 (SCB<sup>13</sup>). I cuscinetti magnetici superconduttivi, sfruttano il comportamento diamagnetico dei superconduttori quando si trovano a temperature al di sotto di quella critica per cui  $\mu_r = 0$ . Il diamagnetismo è una forma di magnetismo che tutti i materiali mostrano in presenza di un campo magnetico. Si tratta di un effetto molto debole di natura quantistica, che viene annullato qualora il materiale goda di altre proprietà magnetiche come il ferromagnetismo o il paramagnetismo. I materiali in cui il diamagnetismo si manifesta in maniera rilevante sono detti materiali diamagnetici, e sono caratterizzati dal fatto che la magnetizzazione ha verso opposto rispetto al campo magnetico, e quindi di esserne debolmente "respinti". In ambito non scientifico i materiali diamagnetici sono spesso semplicemente detti "non magnetici". Un superconduttore presenta due caratteristiche fondamentali che lo etichettano un cuscinetto "ad hoc" per la sospensione stabile: sfrutta l'effetto Meissner e presenta resistenza elettrica nulla.

Il primo concerne il comportamento che presenta un magnete permanente posto sopra una superficie superconduttiva prima che questa sia raffreddata al punto da raggiungere lo stato di superconduttività. Questa situazione è chiamata "Field quenching" ("Campo Temprato"). Esso consiste nel congelamento del campo magnetico indotto nel materiale superconduttivo, creando così un'immagine virtuale del magnete. Il campo congelato garantisce la stabilità sia in direzione radiale che assiale e se la posizione dei due corpi si capovolge sotto sopra, il magnete non cade. Unico onere, costoso, è l'utilizzo di costosi sistemi criogenici per il materiale superconduttivo.

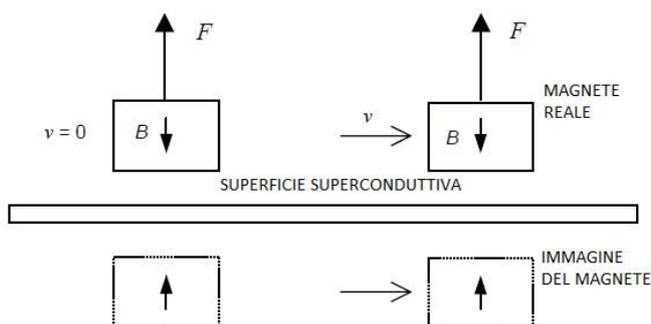


Figura 3.4 – Forza repulsiva dovuta all'effetto Meissner, sia a velocità nulla che diversa da zero.

<sup>11</sup> PMB: Passive Magnetic Bearing.

<sup>12</sup> Levitron: dispositivo che ruota stabile in aria grazie alle interazioni tra campo magnetico e forze giroscopiche.

<sup>13</sup> SCB: Super-Conducting Bearing.

Quanto detto per i SCB è tutto teoricamente realizzabile ma di difficile applicazione a causa delle scadenti proprietà meccaniche dei materiali superconduttivi e dell'onere energetico del sistema di raffreddamento.

Recenti studi sono stati inoltre condotti su materiali che presentano il fenomeno della superconduttività già alla temperatura di liquefazione dell'azoto, denominati HTS<sup>14</sup> [19].

### 3.2.2 Sospensione elettrodinamica

La massima forza è generata a velocità infinita. Sapendo inoltre che solitamente il contributo del campo elettrico è trascurabile rispetto a quello del campo magnetico e che  $\bar{\mathbf{i}} = Q\bar{\mathbf{v}}$ , vale:

$$\bar{\mathbf{f}} = \bar{\mathbf{i}} \times \bar{\mathbf{B}} \quad (3.5)$$

La forza è ortogonale alle linee di flusso, indipendente dal traferro e linearmente dipendente dalla corrente, nell'ipotesi che il flusso sia indipendente da quest'ultima.

Questi tipi di cuscinetti presentano numerose similitudini con i generatori ad induzione, spesso denominati "cuscinetti a correnti indotte". La corrente  $i$  può essere indotta o controllata in modo attivo. Se indotta deriva o dall'interazione tra campo prodotto da un magnete in movimento su un materiale conduttivo (Tipo 5), oppure, al posto del magnete in movimento, da una bobina percorsa da corrente alternata. Altrimenti la corrente controllata attivamente, è fatta interagire con il campo magnetico prodotto da magneti permanenti (Tipo 8).

Il principio di funzionamento si fonda sulla legge di Lenz, per cui la variazione di flusso in un conduttore induce in esso una tensione  $e$ , di conseguenza, una corrente tale da opporsi alla variazione di flusso che li genera. Tutto ciò si traduce in una repulsione tra la sorgente originaria del flusso e il conduttore.

- Tipo 5. La sospensione elettrodinamica avviene senza controlli, grazie all'induzione di corrente quando due corpi (uno generante il campo) si muovono di moto relativo e veloce l'uno opposto all'altro. In accordo con la legge di Lenz, è generata una forza repulsiva che solleva il corpo dallo "statore". Affinché si generino elevate densità di flusso, i materiali più idonei da utilizzare sarebbero i superconduttori ma, dal punto di vista economico, non rappresenta la scelta più appropriata.
- Tipo 6. La tipologia 6 sfrutta lo stesso principio di quello del Tipo 5, con la differenza che ora lo spostamento relativo è sostituito da una sorgente di flusso alternato.
- Tipo 7. Il principio di funzionamento della tipologia 7 è applicato ai motori ad induzione, ovvero nello statore è prodotto un campo magnetico tale per cui la reazione d'indotto consente la centratura del rotore rispetto lo statore.
- Tipo 8. Il Tipo 8, invece, si differenzia dal precedente per il fatto che l'avvolgimento d'indotto è sostituito da magneti permanenti.

Benché le forze ottenute siano deboli, soprattutto a basse velocità, i cuscinetti elettrodinamici sono utilizzati nelle applicazioni che soffrono, per esempio, di disturbi nel materiale ferromagnetico come i problemi di isteresi. Nel complesso, sono comunque poco utilizzati a causa delle elevate correnti da dover indurre per ottenere apprezzabili valori di forza.

---

<sup>14</sup> HTS: High-Temperature Superconducting.

### 3.3. Tipologia di sensori

Per come sono concepiti i cuscinetti magnetici, la posizione relativa tra cuscinetto e sistema sospeso deve poter essere misurata e monitorata con continuità al fine di evitare collisioni tra le due parti. Soprattutto per i sistemi controllati in modo attivo (es. cuscinetti AMB) l'informazione di posizione è fondamentale al sistema di controllo stesso.

A tal proposito esistono molti tipi di sensori, comunemente detti "di prossimità". I sensori di prossimità sono dei sensori capaci di rilevare la presenza di un oggetto nelle vicinanze del sensore stesso senza che vi sia contatto tra i due. Ovviamente, non è solo necessario conoscere se c'è o meno qualcosa nelle vicinanze ma è importantissima la precisione della misura.

I principali vantaggi sono le elevatissime risoluzioni ( $\mu\text{m}$ - $\text{nm}$ ) e l'assenza di attuatori meccanici, cioè di dispositivi che prevedono il contatto fisico tra sensore ed oggetto il quale è indice di elevata affidabilità. La maggior parte delle tipologie che verranno descritte in seguito, si riferiscono a prodotti totalmente personalizzabili a seconda dell'applicazione [20].

I sensori sono di diversi tipi, a seconda del principio fisico cui si basano:

- Sensori capacitivi;
- Sensori induttivi;
- Sensori laser;
- Sensori ottici;
- Sensori ad ultrasuoni [21].

#### 3.3.1 Sensori capacitivi

I sensori capacitivi rilevano la capacità elettrica di un condensatore le cui armature sono rappresentate rispettivamente dal sensore e dall'oggetto conduttore.

Il principio di funzionamento consiste nella stima del campo elettrico tra oggetto e l'elettrodo interno al sensore, il quale è reso uniforme grazie all'ausilio di un "elettrodo di guardia" che lo racchiude. La misura prevede la determinazione dell'ampiezza della tensione alternata applicata rispetto una tensione di riferimento la quale è proporzionale alla distanza tra le due armature ed è infine portata all'esterno come segnale analogico.

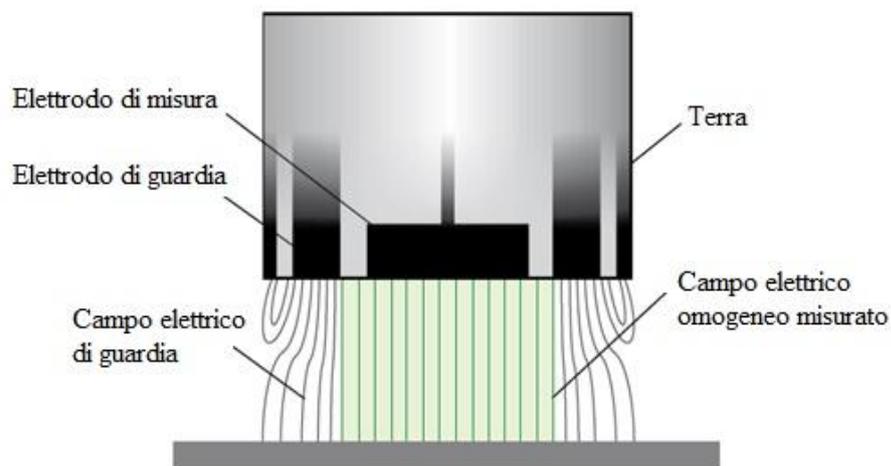


Figura 3.5 – Struttura sensore capacitivo.

Le principali caratteristiche possono essere così riassunte:

- Assenza di contatto tra sensore e oggetto;
- Assenza di forze nel sistema da misurare;
- Assenza di conduzione di corrente nell'oggetto;
- Immunità ai disturbi elettromagnetici e alla temperatura (fino a 4°K);
- Portate fino a 10mm;
- Dinamicamente lenti rispetto ai sensori induttivi.



Figura 3.6 – Tipi di sensori capacitivi.

### 3.3.2 Sensori induttivi

I sensori induttivi si possono suddividere a loro volta in due tipologie:

- la prima raggruppa i sensori che sfruttano l'effetto elettromagnetico trasformatore di variazione lineare della tensione differenziale secondaria, con nucleo solenoidale all'oggetto mobile;

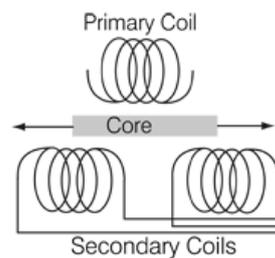


Figura 3.7 – Schema di principio sensore induttivo ad effetto trasformatore.

- la seconda ingloba i sensori a “correnti indotte” il cui principio di funzionamento consiste nella misura della variazione dell'impedenza di una bobina (in ampiezza e fase) legata alla riduzione del flusso ad opera dalle correnti indotte che si oppongono al flusso principale.

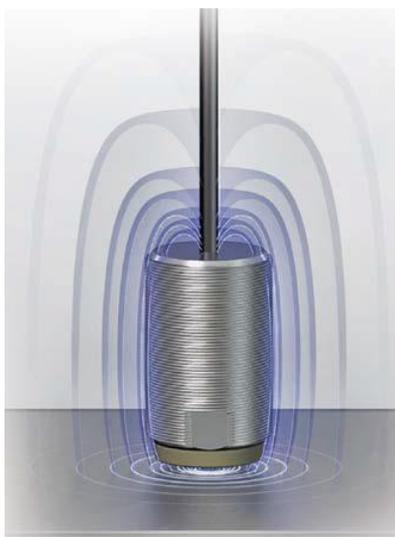


Figura 3.8 – Sensore induttivo a correnti indotte.

Complessivamente questi sensori sono caratterizzati da:

- Assenza di contatto tra sensore ed oggetto;
- Elevata stabilità alle variazioni di temperatura;
- Dinamicamente molto performanti (correnti AC indotte ad alta frequenza);
- Elevato intervallo di misura e risoluzione dell'ordine fino ai nm.

Vi è un'ulteriore classe di sensori, apparentemente mix delle due precedenti, che sfruttano il principio di induzione magnetica e raggruppa i così detti sensori ad effetto Hall. Essi rilevano la tensione in un circuito elettrico prodotta da un magnete solidale con l'albero (forte dipendenza dalla temperatura difficile da compensare). Ovviamente questa tipologia non può essere utilizzata in prossimità di fonti elettromagnetiche che possono creare disturbi alla misura.

### 3.3.3 Sensori ottici

Questa tipologia di sensori, detti anche fotoelettrici, si basano sulla captazione del raggio luminoso riflesso dall'oggetto in esame. Solitamente, per le misure di posizione, si utilizzano raggi infrarossi perché sono difficilmente perturbabili da altre fonti luminose esterne. Il principio di funzionamento consiste nell'analisi della radiazione riflessa del fascio luminoso incidente la superficie dell'oggetto. I fattori maggiormente influenzanti sono la composizione e l'orientamento della superficie, fattori per il quale, montando sull'oggetto dei catadiottri, è possibile ottimizzare il substrato di riflessione ed aumentarne la portata nominale (fino a 50m).



Figura 3.9 – Sensori ottici.

Caratteristiche principali:

- Portate da 0.3 mm a 30 mm;
- Economicità;
- Dinamica della misurazione molto elevata;
- Dispositivo molto compatto;
- Risoluzione nanometrica;

### 3.3.4 Sensori laser

I sensori laser sono una particolare tipologia di sensori che sfruttano l'emissione di un fascio di luce altamente concentrato che consente la misura della distanza tra due oggetti. La tecnica di misura prevede una triangolazione di raggi laser la cui informazione di posizione è rilevata "virtualmente" da un sistema captativo composto da speciali lenti. Questo sistema risulta molto accurato e ad elevata risoluzione, utilizzato moltissimo nei sistemi in cui il contatto tra le due superfici (o oggetti) è impossibile (es. fluido caldo, corpi in movimento ad elevata velocità, ecc).

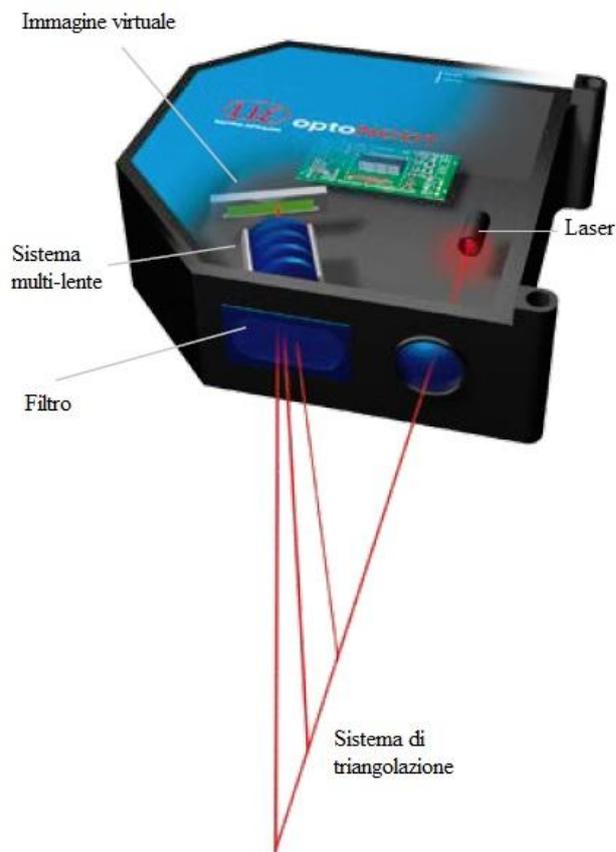


Figura 3.10 – Schema di principio sensore laser.

### 3.3.5 Sensori ad ultrasuoni

I sensori di prossimità ad ultrasuoni funzionano sul principio del Sonar: emettono impulsi sonori ultrasonici, e rilevano un'eventuale eco di ritorno generata dalla presenza di un oggetto all'interno della portata nominale.

Vista la complessità, questi sensori sono costosi, ma dispongono spesso di funzioni evolute:

- Settaggio della distanza di commutazione;
- Settaggio del campo sensibile;
- La velocità di commutazione di questi sensori di prossimità è bassa;
- Possono avere portate nominali molto elevate (fino a 10 m);
- Sono immuni ai disturbi elettromagnetici;
- Possono rilevare oggetti di qualsiasi materiale (eccetto materiali fonoassorbenti).

Una certa attenzione va però posta nella dimensione e nell'orientamento della superficie dell'oggetto che si rivolge al sensore, infatti una superficie troppo piccola o orientata malamente (non ortogonale alla direzione di lettura del sensore) può non assicurare la generazione di un'eco rilevabile.



## 4. Progetto preliminare del cuscinetto magnetico

---

L'obiettivo principale del seguente capitolo è quello di sviluppare il progetto di un cuscinetto elettromagnetico ibrido direttamente applicato alla massa rotante del volano avente caratteristiche ferromagnetiche (acciaio) che ne consegue l'utilizzo come secondario per la richiusura del campo. La destinazione d'uso è relativa all'accumulo stazionario di energia, più precisamente si tratta di un'applicazione fissa a bassa potenza (sistema ausiliario). Esso sarà composto da un magnete, dimensionato in modo tale da sostenere tutta la massa rotante, e da una bobina di controllo agente in modo da equilibrare il sistema in caso di squilibrio verticale e radiale.

Il sistema, nel complesso, deve sottostare al vincolo di massima economicità (dunque costi contenuti).

Lo sviluppo dello studio è stato svolto con l'ausilio del software di analisi agli elementi finiti Ansys Maxwell 2D®. Grazie alla simmetria cilindrica, il sistema è stato studiato nel riferimento spaziale  $rz$  e solo per le verifiche di spinta radiale è riportato nel sistema decentrato  $xy$ .

### 4.1 Caratterizzazione del sistema

Nel prosieguo del capitolo si vuole descrivere con maggior dettaglio la procedura di modellizzazione del cuscinetto a levitazione magnetica.

L'idea è quella di partire da un volano avente le seguenti caratteristiche fisiche e geometriche elencate:

- Potenza nominale  $P_n = 20 \text{ kW}$ ;
- Tempo di scarica 3-5 min;
- Composizione: acciaio AISI 4340;
- Massa totale lorda di circa 150 kg;
- Intervallo di velocità:  $\Omega_{min} = 7000 \text{ rpm}$ ,  $\Omega_{max} = 20000 \text{ rpm}$  ;
- Fattore di forma:  $K = 0.75$ ;

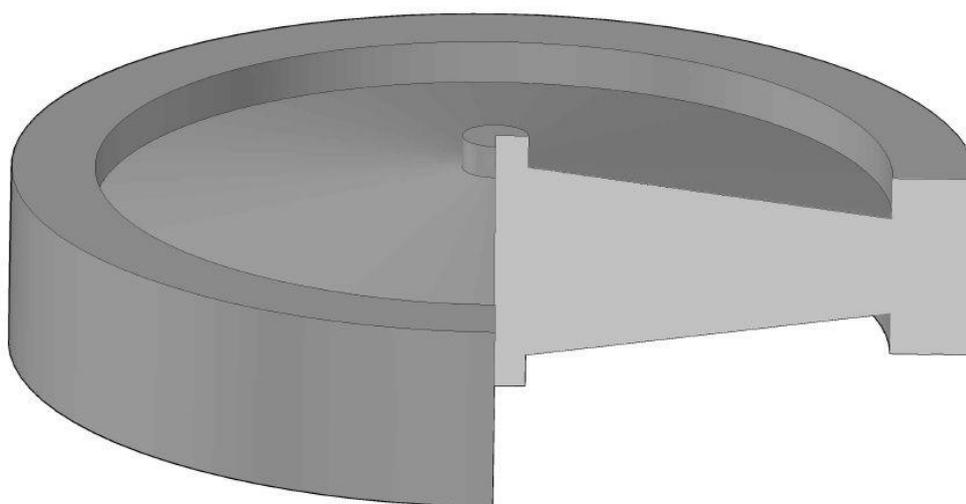


Figura 4.1 – Sezione 3D del volano.

La massa totale lorda fa riferimento a quella del volano e della parte rotante della macchina elettrica. La disposizione spaziale del volano sarà con asse di rotazione in posizione verticale dunque parallelo all'asse  $z$ .

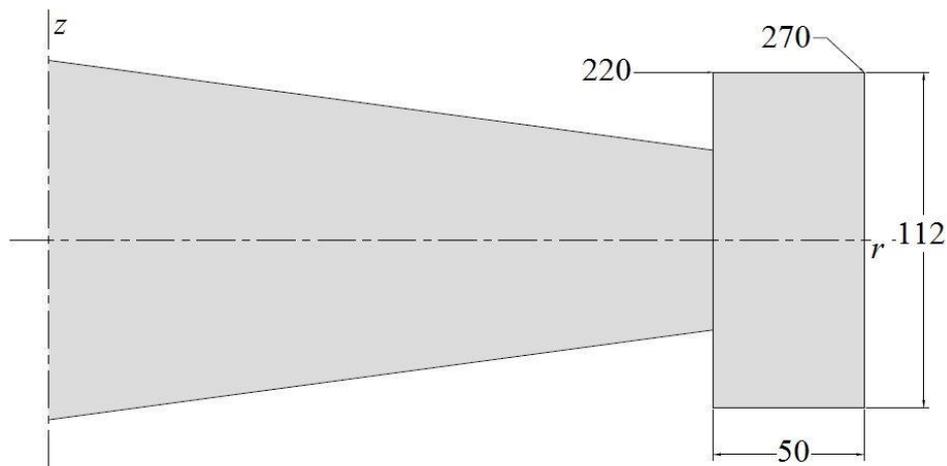


Figura 4.2 – Proiezione ortogonale della simmetria del volano nel riferimento  $rz$  con dimensioni in mm.

La superficie utile di interfaccia del cuscinetto magnetico corrisponde dunque alla parte superiore del bordo del volano che si estende radialmente per 50 mm ( $S_{tot} = 77 * 10^{-3} m^2$ ).

Le simulazioni FEM e le relative analisi parametriche condotte nell'elaborato, fanno riferimento a grandezze spaziali così definite: in primis il traferro  $g$  oppure la sua variazione  $\Delta g$  rispetto la grandezza di riferimento  $g^*$ , in altri casi invece (soprattutto nella modellizzazione del controllo) si considera la coordinata spaziale verticale  $z$  (con  $z = z_{mb} - 56$  [mm], andamento simmetrico rispetto  $g$ ).

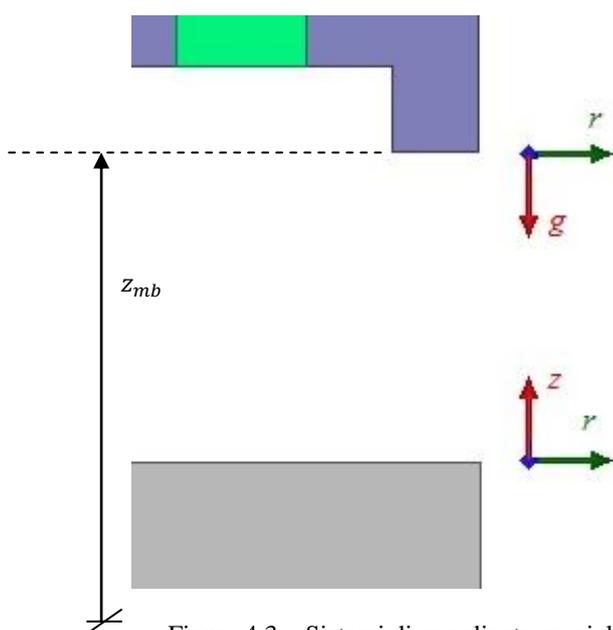


Figura 4.3 – Sistemi di coordinate spaziali.

Per quanto riguarda il cuscinetto magnetico, esso sarà principalmente composto da un magnete avente magnetizzazione radiale (per convenzione, di direzione e verso secondo lo sviluppo radiale  $d\vec{r}$ ) racchiuso da un circuito ferromagnetico (acciaio dolce). Inoltre risulta di particolare interesse parametrizzare la geometria per le successive fasi di ottimizzazione e parametrizzazione in Maxwell. Si considerino dunque i termini definiti in Figura 4.4.

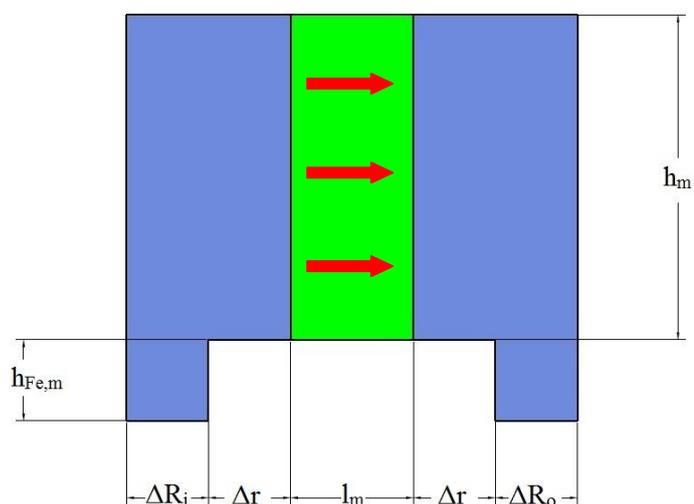


Figura 4.4 – Parametrizzazione del cuscinetto magnetico.

## 4.2 Materiali

Il materiale di cui è composta il volano è il 40NiCrMo7, noto anche come AISI/SAE 4340 nella normativa americana. Si tratta di un acciaio ad alto resistenziale, generalmente usato per la realizzazione di componenti meccanici speciali. Questo tipo di acciaio ad elevate prestazioni non è presente nella libreria dei materiali contenuta nel software Maxwell e sarà quindi necessario creare un nuovo materiale ed importare i punti costituenti la curva  $BH$ , data la non linearità del materiale stesso. A tal fine, è stato possibile dedurre da [22], una caratterizzazione del materiale molto precisa ed accurata.

Tabella 4.1 – Parametri curva di magnetizzazione (4.2) dell'acciaio AISI 4340.

$\mu_r$	600
$J_s$ [T]	1.8 T
$a$	0.04
Temperatura di Curie [°C]	785 °C

$$H_a = \mu_0 H \frac{\mu_r - 1}{J_s} \quad (4.1)$$

$$B(H) = \mu_0 H + J_s \frac{H_a + 1 - \sqrt{(H_a + 1)^2 - 4H_a(1 - a)}}{2(1 - a)} \quad (4.2)$$

$J_s$  valore di saturazione magnetica.

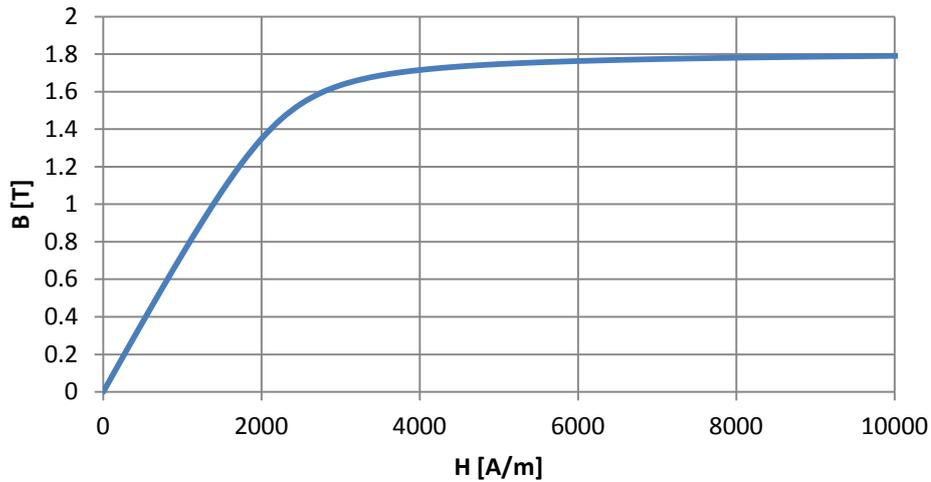


Figura 4.5 – Curva BH acciaio AISI 4340.

Il tipo di acciaio ferromagnetico costituente le espansioni polari che andranno a formare il circuito di richiusura delle linee di flusso prodotte dal magnete e dalla bobina è un acciaio dolce, non molto performante dal punto di vista magnetico e non sarà laminato in quanto non è soggetto a variazioni di flusso e dunque a correnti indotte..

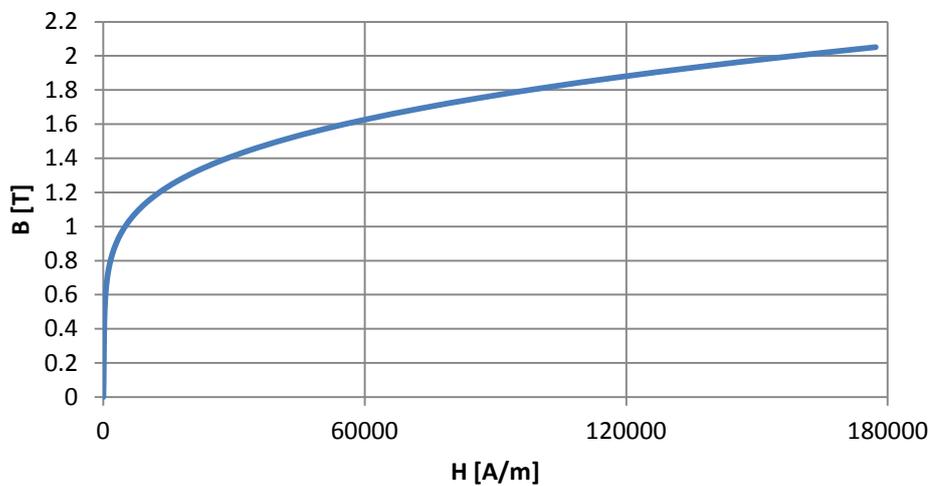


Figura 4.6 – Curva BH acciaio ferromagnetico dolce.

Il magnete scelto per la nostra applicazione è un Neodymium (NdFeB) 35M le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4.2 [23].

Tabella 4.2 – Parametri magnetici (NdFeB) 35M.

$\mu_r$	1.0998
$B_r$ [T]	1.22
$H_c$ [kA/m]	-890
$T_{max}$ [°C]	80

Esso è, assieme a quelli di tipo samario-cobalto, tra i materiali magnetici più innovativi e performanti presenti nel mercato, i quali si trovano in ogni forma e dimensione. I maggiori impieghi sono quelli in cui sono richieste ottime proprietà magnetiche con dimensioni ridotte del componente.

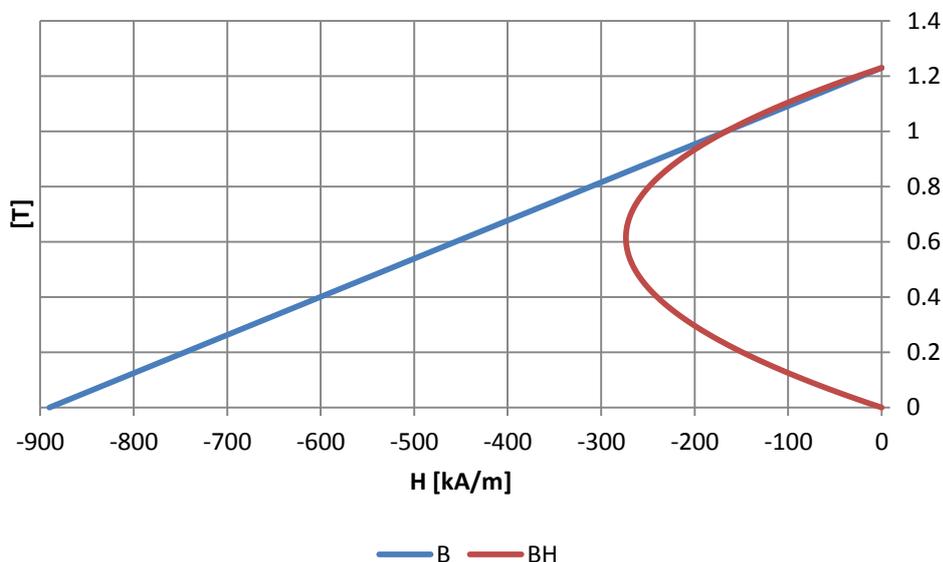


Figura 4.7 – Approssimazione lineare della caratteristica del magnete (NdFeB) 35M.

### 4.3 Introduzione di Ansys Maxwell

I paragrafi seguenti riassumono le principali funzionalità del programma utilizzato nelle fasi di dimensionamento del cuscinetto.

Maxwell® 2D è un software che sfrutta l'analisi agli elementi finiti (FEM) per simulare e risolvere problemi elettromagnetici in 2D. Generalmente è usato per analizzare i campi elettrici e magnetici in strutture a simmetria cilindrica  $rz$  o a sezione uniforme  $xy$  (se il sistema presenta effetti di bordo non trascurabili o non presenta simmetria cilindrica, è necessario modellizzarlo in 3D al fine di ottenere maggiore accuratezza).

La procedura per svolgere correttamente passo a passo lo studio di un sistema 2D, può essere sintetizzato in pochi passaggi:

- a. Selezionare la tipologia di soluzione del problema che si vuole svolgere, per esempio nel nostro caso, quella di tipo Magnetostatico: le grandezze fisiche coinvolte sono il campo magnetico  $\vec{H}$ , densità di corrente  $\vec{J}$ , induzione magnetica  $\vec{B}$ , forza, coppia, energia e induttanza.
- b. Disegnare la geometria del modello.
- c. Definire la mesh negli oggetti. Nel Solver Magnetostatico l'elaborazione della mesh è fatta in modo automatico secondo un criterio adattativo di minimizzazione dell'errore dell'energia calcolata. Essa è infatti progressivamente ridefinita durante la soluzione in modo automatico secondo le stime di accuratezza impostate. Solitamente al termine di tale preliminare ed automatico processo, si procede con la definizione manuale da parte dell'utente della mesh laddove sia necessaria maggiore accuratezza computazionale. Gli strumenti disponibili nel Maxwell permettono di limitare la grandezza dei triangoli (o tetraedri elementari se 3D),

- nonché definirne un numero massimo all'interno dell'oggetto, anche a seconda dello spessore di penetrazione dello specifico materiale impiegato (se il caso è AC).
- d. Assegnare agli oggetti il tipo di materiale di cui sono costituiti.
  - e. Definire le condizioni di contorno agli oggetti, laddove fossero presenti simmetrie o periodicità dei campi e associarne i generatori di corrente.
  - f. Definire operazioni di parametrizzazione e di ottimizzazione del sistema in esame. La prima consiste nel definire una o più serie di variabili che variano in un certo modo (linearmente o secondo una funzione) all'interno di un intervallo di definizione. Il programma ricava una soluzione per ogni variabile e per ogni variazione stabilita. Solitamente tale funzionalità è utilizzata preliminarmente all'ottimizzazione così da avere un'idea in merito agli estremi dell'intervallo di indagine da investigare, per non appesantire il programma e per ridurre i tempi di calcolo. La seconda (l'ottimizzazione) verrà descritta più in dettaglio nel paragrafo 4.3.1.
  - g. Eseguire la simulazione.
  - h. Operazioni di "Post-processing", ovvero visualizzazione dei risultati sotto forma di grafici, dati di convergenza della soluzione esportabili in altri formati, visualizzazione della mesh definitiva di ultima approssimazione e risultati dei processi di ottimizzazione e parametrizzazione.

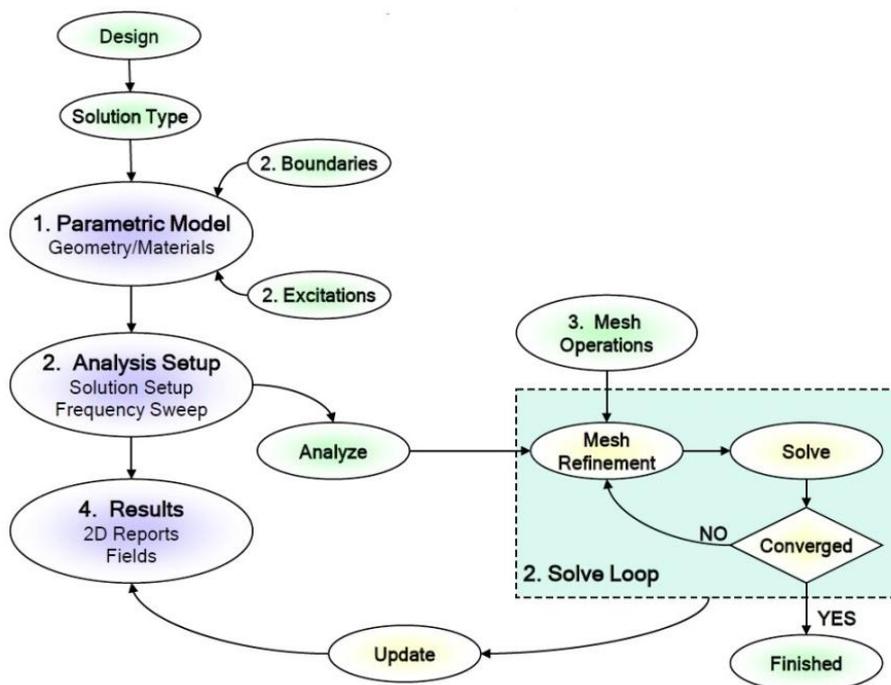


Figura 4.8 –Diagramma di flusso del procedimento di soluzione [24].

### 4.3.1 Utilizzo dell'Ottimizzatore

Durante lo svolgimento dello studio della configurazione del cuscinetto, è stato necessario quantificare i volumi dei materiali utilizzati trattandosi di materiali particolarmente costosi come possono essere i magneti a terre rare, AlNiCo, ecc. Per tale finalità, il Maxwell ingloba nel proprio pacchetto uno strumento di grande utilità: l'Ottimizzatore. Esso consente di determinare la migliore soluzione scansionando un certo dominio di variazioni dei parametri del problema. L'impostazione del problema vede la definizione di una funzione obiettivo e del target desiderato, che può essere di

ricerca di massimo o di minimo oppure del raggiungimento di un valore desiderato. Viene dunque creato un modello iniziale nominale sulla base del quale il Maxwell calcola la soluzione variando gli input stabiliti.

L'Ottimizzatore sfrutta diverse tipologie di metodo per giungere alla soluzione desiderata. La scelta verte tra i seguenti:

- a. Sequential Non-linear Programming (SNLP): il principale vantaggio della “programmazione sequenziale non lineare” rispetto al metodo Quasi Newton (che vedremo in seguito) è la ricerca più approfondita della soluzione (è il metodo più utilizzato nel nostro caso). Il dominio di indagine è più grande e la ricerca, per esempio di minimo, spazia nell'intero intervallo di definizione dei parametri variabili. Nell'ottimizzazione SNLP vi è un'attenuazione degli effetti di disturbo la quale conduce ad una più rapida convergenza. Alcuni vantaggi rispetto agli altri metodi sono rappresentati dal fatto che l'SNLP è finemente integrato con la definizione degli elementi finiti, è un metodo d'indagine di tipo sequenziale ed iterativo, non necessita di calcolare la derivata della funzione obiettivo svincolandosi così da problemi di “rumore” e di non linearità presenti nel problema garantendo complessivamente una maggiore generalità rispetto agli altri metodi.
- b. Sequential Mixed Integer Non-Linear Programming (SMINLP): questo metodo di ottimizzazione è molto simile al precedente ad eccezione fatta che alcune variabili possono assumere solo valori discreti. Pertanto i valori dei parametri variabili saranno continue di tipo intero.
- c. Quasi Newton: questo criterio viene utilizzato laddove i disturbi non sono rilevanti, in alternativa all'SNLP. In particolare è utilizzato al fine di ricercare il minimo o il massimo di una funzione obiettivo che può essere per esempio una forza, variando alcuni parametri del problema, per esempio alcuni parametri geometrici. L'approccio investigativo è di tipo iterativo in cui il gradiente e la stima del parametro variabile rappresentano informazioni utili per l'iterazione successiva. Tale metodo possiede un elevato grado computazionale a causa del numero di stime adottate per ciascuna variazione dei parametri.  
Il criterio Quasi Newton soffre anche di altri due problemi: presenza di eventuali minimi locali e disturbi computazionali. Questi ultimi, in particolare nascono da oscillazioni indesiderate nelle stime puntuali delle derivate le quali possono non portare a convergenza il sistema o comunque a delle rilevanti imprecisioni. Pertanto è necessario prestare particolare attenzione alla formulazione della funzione obiettivo, alla scelta dei parametri da cui essa dipende e dalla scelta del/dei valori di partenza che dovranno essere i più vicini possibili alla soluzione attesa. Questa tecnica risulta difficilmente applicabile nei casi in cui la funzione dipende da molti parametri ed è consigliato implementarla solo quando dipende, al contempo, da poche variabili (una o due).
- d. Pattern Search (Modello di Ricerca): qualora i disturbi computazionali non fossero trascurabili, questo metodo numerico rappresenta la migliore soluzione d'indagine di processo. Esso sfrutta una costruzione matematico-geometrica basata su simpleso, entità geometrico-spaziali aventi il minimo numero di vertici. Il valore della funzione obiettivo è calcolato nei vertici del simplex stesso. Se il risultato calcolato nell'entità successiva è migliore del precedente allora viene mantenuto quest'ultimo e l'indagine prosegue, altrimenti viene ridefinita la geometria dei simplex. Generalmente, questo metodo non è utilizzato quando l'ottimizzatore deve calcolare simultaneamente più di tre variabili ed è preferito al Quasi Newton per la minore sensibilità ai disturbi; il campo di esistenza iniziale delle soluzioni è più ristretto ma, non sfruttando i gradienti nel procedimento, comporta maggiori tempi di calcolo.
- e. Genetic Algorithm (GA): questa tecnica di ottimizzazione è anche chiamata “tecnica di ricerca random”. Essa infatti, non impiega informazioni derivanti da manipolazioni della

funzione obiettivo (es. calcolo delle derivate) ma effettua una vera e propria selezione casuale dei valori delle variabili, svincolarsi così da eventuali minimi locali. È banale concludere che, per tale motivo, per giungere a convergenza sono richiesti tempi computazionali molto lunghi.

#### 4.4 Criterio del “Pareggio delle aree”

Le ipotesi preliminari di progetto sono:

- Induzione al traferro:  $B_g = 0.8 T$ ;
- Punto di lavoro del magnete in condizioni di massima energia specifica:  $B_m^* = 0.6 T$ ;
- Riluttanza del circuito ferromagnetico trascurabile;
- Traferro di riferimento:  $g^* = 2 mm$ .

Con le suddette ipotesi, è possibile stimare analiticamente le dimensioni del magnete. In linea di principio, il sistema è composto da un magnete avente forma ad anello chiuso e posizionato nel raggio medio della superficie utile del volano. Esso avrà sviluppo radiale  $l_m$  e altezza  $h_m$ . Come già accennato, ad esso è assegnato il ruolo chiave del lavoro e cioè quello di vincere la forza peso del volano  $F_g$  e mantenerlo sospeso in modo stabile.

$$F_g = 1500 N \quad (4.3)$$

$$F_g = F_m = \frac{\partial W_m}{\partial g} = \frac{B_g^2}{2\mu_0} S_g \quad (4.4)$$

$W_m$  energia magnetica;  $F_m$  forza magnetica;  $S_g$  superficie totale del traferro.

$$\mu_0 = 4\pi * 10^{-7} \frac{Vs}{Am} \text{ (permeabilità magnetica a vuoto)}$$

Vale dunque il principio di conservazione dell'energia:

$$B_g H_g V_g = B_m^* H_m^* V_m (1 - k_\sigma) \quad (4.5)$$

$H_g$  campo magnetico al traferro;  $H_m^*$  campo magnetico del magnete nel punto di massima energia specifica;  $V_g$  volume del traferro;  $V_m$  volume di magnete;  $k_\sigma$  coefficiente di dispersione.

La presenza del coefficiente di dispersione cautela il dimensionamento del volume del magnete dalle inevitabili dispersioni presenti nel modello reale ( $k_\sigma = 0.2$ ). Dall'espressione (4.5) è calcolato il valore del volume di magnete  $V_m$ .

Per ricavare lo sviluppo radiale  $l_m$  del magnete, si considera il circuito magnetico equivalente:

$$H_m^* l_m = \frac{B_g}{\mu_0} 2g \quad (4.6)$$

Avendo  $V_m$  e  $l_m$  si ricava l'altezza del magnete  $h_m$ .

Per quanto concerne lo sviluppo radiale delle espansioni polari, fermo restando che la loro somma non deve superare i 50 mm di totale sviluppo radiale disponibile del volano (4.7), si applica la condizione di pareggio delle aree.

$$50 = \Delta R_i + 2\Delta R + \Delta R_o \quad (4.7)$$

Si può dimostrare infatti che la condizione che massimizza la forza a parità di altre condizioni è rappresentata dall'uguaglianza delle superfici delle due espansioni polari.

Siano  $S_o$  e  $S_i$  le superfici delle espansioni esterna ed interna.

Ipotesi:  $S_o = S(1 + \Delta)$ ,  $S_i = (1 - \Delta)S$  con  $S$  superficie media, riluttanze al traferro  $\mathcal{R}_{go} = \frac{g}{\mu S_o}$  e  $\mathcal{R}_{gi} = \frac{g}{\mu S_i}$ ,  $\Psi$  flusso magnetico.

$$\begin{cases} -H_m l_m + \mathcal{R}_{go} \Psi_{go} + \mathcal{R}_{gi} \Psi_{gi} = 0 \\ \Psi_{go} = \Psi_{gi} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} (H_{gi} + H_{go})g = H_m l_m \\ H_{go} S_o = H_{gi} S_i \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} H_{go} = \frac{(1 - \Delta)H_m l_m}{2g} \\ H_{gi} = \frac{(1 + \Delta)H_m l_m}{2g} \end{cases} \quad (4.8)$$

$$F_m = \frac{\mu_o}{2} (H_{gi}^2 S_i + H_{go}^2 S_o) = \frac{\mu_o H_m^2 l_m^2 S (1 - \Delta^2)}{4g^2} \quad (4.9)$$

A parità di altre condizioni, la forza è massima per  $\Delta = 0$ , cioè quando le aree sono uguali. Nell'ipotesi che  $S_i$  e  $S_o$  fossero diverse del 10%, la forza magnetica varierebbe dell'1%, motivo per cui, entro certi limiti, potrebbe essere trascurata la validità del pareggio delle aree.

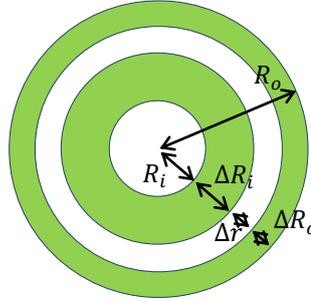


Figura 4.9 – Suddivisione schematica degli sviluppi radiali delle superfici del volano.

Ricavata  $l_m$ , è eguagliata allo sviluppo radiale  $\Delta r$  corrispondente allo spazio tra le due espansioni polari del circuito di richiusura del flusso magnetico. Considerando inoltre per semplicità  $\Delta R = 0$ ,  $h_{Fe,m} = 2 \text{ mm}$  ed essendo il raggio interno della superficie utile del volano  $R_i = 220 \text{ mm}$  e quello esterno  $R_o = 270 \text{ mm}$  si possono calcolare gli ingombri radiali  $\Delta R_o$  e  $\Delta R_i$  (per cui vale il pareggio delle aree).

$$\Delta R_o = \frac{1}{2} \left( -\Delta r + 2R_o - \sqrt{-\Delta r^2 + 2R_i^2 + 2R_o^2} \right) \quad (4.10)$$

$$\Delta R_i = \frac{1}{2} \left( -\Delta r - 2R_i + \sqrt{-\Delta r^2 + 2R_i^2 + 2R_o^2} \right) \quad (4.11)$$

Le superfici di ciascuna espansione polare è metà della totale superficie al traferro:

$$S'_g = \frac{S_g}{2} \quad (4.12)$$

Il risultato analitico comporta un sistema che sfrutta tutta la superficie del bordo della massa rotante le cui dimensioni sono riassunte in Tabella 4.2.

Tabella 4.2 – Risultati dimensionamento di massima.

$S'_g$ [m <sup>2</sup> ]	29*10 <sup>-3</sup>
$l_m$ [mm]	6
$h_m$ [mm]	3
$\Delta R_o$ [mm]	21
$\Delta R_i$ [mm]	23

I risultati analitici ottenuti costituiscono una buona base di partenza per il lavoro. Nonostante ciò, con i parametri geometrici della Tabella 4.2, non si ottengono i target di forza necessari a sostenere la forza peso della massa rotante e valori soddisfacenti di induzione al traferro. Per tali motivi si è scelto di lasciare da parte l'approccio analitico e di continuare la progettazione con l'uso esclusivo del simulatore agli elementi finiti.

#### 4.5 Dimensionamento del magnete e del circuito ferromagnetico

Per ovvie ragioni è necessario continuare lo sviluppo del cuscinetto mediante software FEM in modo da considerare quei fenomeni che, a parametri concentrati, sono difficilmente quantificabili. Inoltre, per semplicità costruttive (e di assemblaggio) ed affinché il magnete possa essere integrato in un unico sistema di controllo attivo di asse verticale ed orizzontale, è opportuno vincolare la sua parametrizzazione all'estremità più esterna del bordo del volano.

Sia il valore di traferro costante di 2 mm; si trascuri inoltre il vincolo di uguaglianza tra le superfici delle espansioni polari. Il punto cruciale del dimensionamento consiste nello sfruttare la funzione Ottimizzatore presente nel Maxwell. Questo strumento consente di definire una "funzione obiettivo" la quale può dipendere da molteplici parametri fisici e geometrici, come forze, lunghezze, spessori, ecc.

La funzione obiettivo implementata è così espressa:

$$F_{ob} = \alpha_1 \frac{V_{Fe}}{V_{Fe}^*} + \alpha_2 \frac{V_{PM}}{V_{PM}^*} + \beta_1 \left( \frac{F_{volano}}{F_{volano}^*} - 1 \right)^{k_1} \quad (4.13)$$

con  $k_1 = 2$ ;  $\beta_1 = 10^4$ ;  $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ ;  $F_{volano}^* = F_g$

La (4.13) fa riferimento ai valori di volume del ferro e del magnete espressi in modo relativo rispetto ad una precedente configurazione che, in questo caso, è quella derivata dalla stima analitica. Si tratta dunque di minimizzare tale espressione pesando ciascun termine mediante i coefficienti  $\alpha_1, \alpha_2$  e forzando l'uscita dal campo di ricerca qualora l'ultimo addendo della funzione (che per noi rappresenta il vincolo) non fosse soddisfatto. Si potrebbe anche aggiungere un altro termine relativo che tiene conto del pareggio delle aree ma non viene implementato al fine di evitare ulteriori complicazioni. Il vincolo espresso dalla (4.7) è inglobato nelle definizioni dei volumi. I parametri geometrici invece, da cui dipende la funzione obiettivo, sono intrinseci alle espressioni di calcolo dei volumi e sono: altezza del magnete  $h_m$ , sviluppo radiale del magnete  $l_m$  e quelli delle espansioni polari interna  $\Delta R_i$  ed esterna  $\Delta R_o$ . Ovviamente la minimizzazione è strettamente legata al bilanciamento tra la forza peso e la forza di attrazione magnetica. In questo modo, scegliendo un

coefficiente  $\beta_1 = 10^4$ , significa che l'errore deve essere minore di 1/100 per non uscire dal campo delle soluzioni accettabili.

Optando per un bilanciamento equo di riduzione di volume di magnete e di materiale ferromagnetico cioè con  $\alpha_1, \alpha_2 = 0.5$ , i risultati ottenuti possono essere così riassunti:

- Riduzione del 42% in volume di ferro;
- Aumento del 22% in volume di magnete.

L'aumento del volume di magnete era atteso in quanto l'anello magnetico è passato da un posizionamento centrato nel bordo del volano ad una posizione più periferica (raggio medio è aumentato).

L'iter di ottimizzazione è stato costituito da un numero di iterazioni pari a 150 con metodo di analisi SNLP.

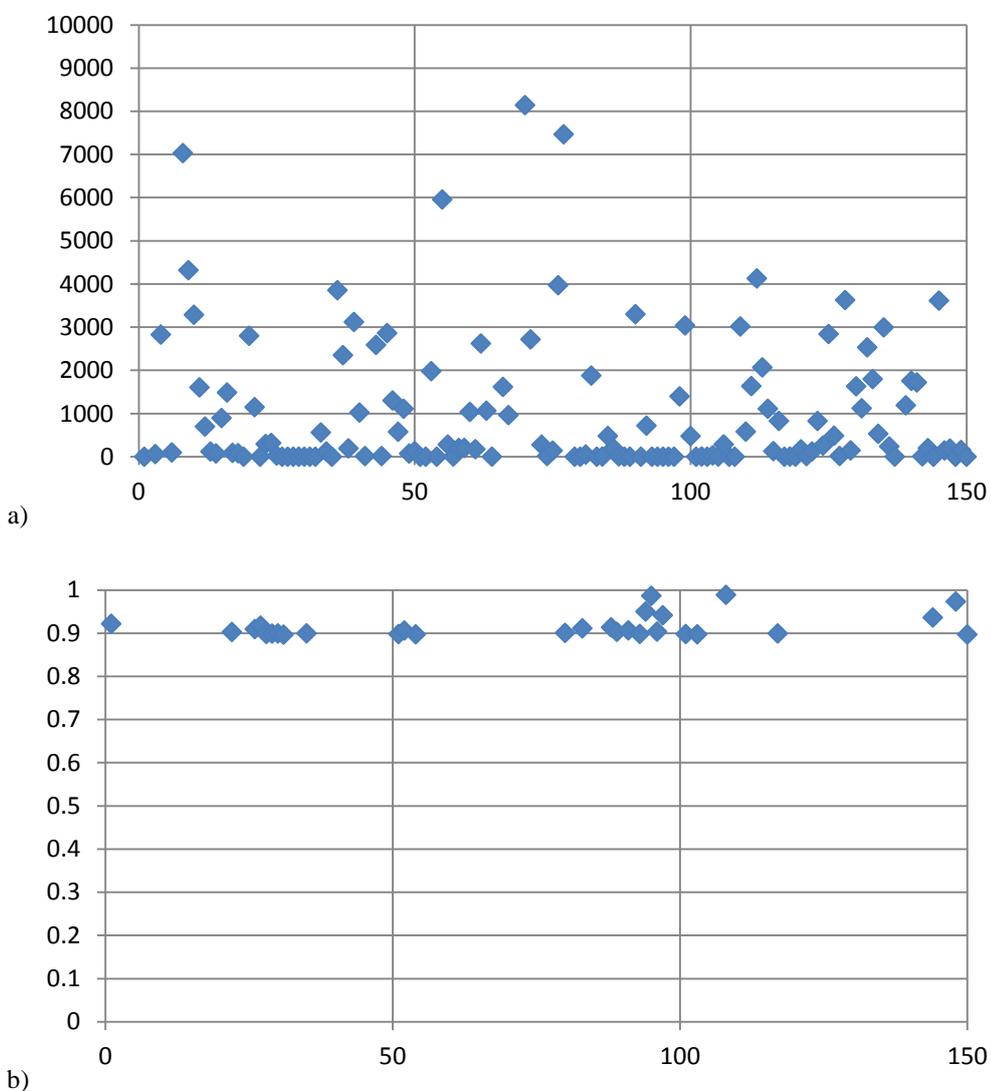


Figura 4.9 – Risultati dell'ottimizzazione della funzione obiettivo: a) risultati globali; b) intervallo di soluzione.

La Figura 4.9-a, mette in luce i risultati dell'ottimizzazione: come auspicato, molti dei valori calcolati sono raggruppati nella linea di tendenza prossima allo zero, più precisamente di valore compreso tra zero e uno data la condizione di minimo. I valori dei parametri geometrici che soddisfano la funzione (4.13) sono tabulati in Tabella 4.3.

Tabella 4.3 – Parametri geometrici del sistema magnetico.

$f_{ob}$	0.8964
$l_m$ [mm]	5.6
$h_m$ [mm]	7.3
$\Delta R_o$ [mm]	2.9
$\Delta R_i$ [mm]	3.2

Il risultato da come configurazione finale quella visualizzabile in Figura 4.10.

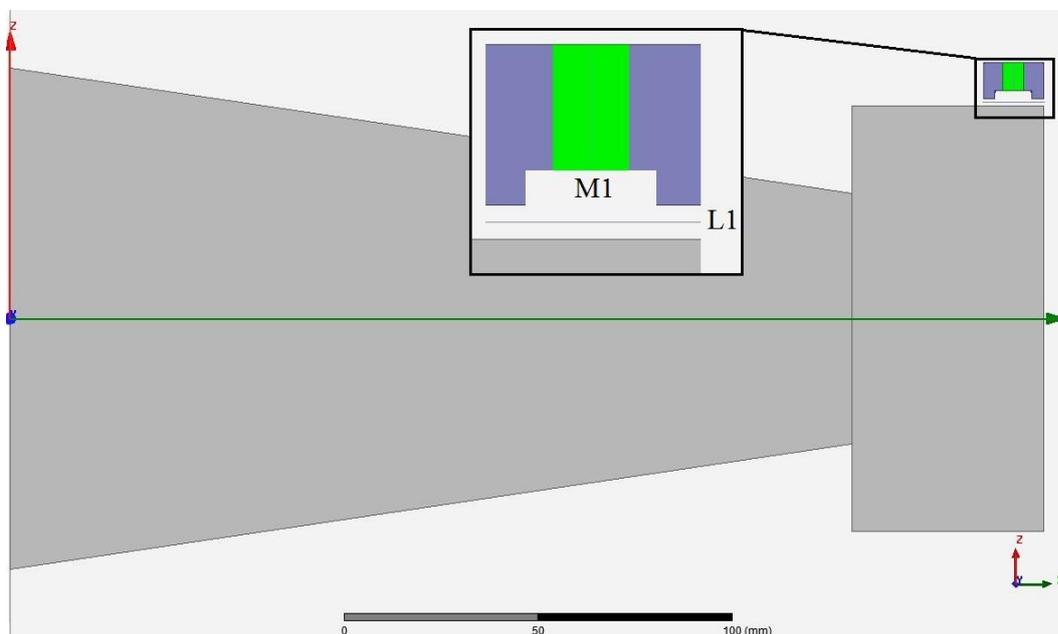


Figura 4.10 – Configurazione del magnete a seguito dell'ottimizzazione volumetrica.

In Figura 4.11 è mostrato invece l'andamento dell'induzione al traferro calcolato lungo la linea L1. Tali valori non coincidono con quelli ipotizzati inizialmente ma sono di valore inferiore. Il motivo principale è dato dal fatto che la simulazione coinvolge campi espressi a parametri "distribuiti" e vi è la presenza di dispersioni del magnete nonché di cadute di tensione magnetica per cui il flusso "reale" che arriva al traferro è minore di quello prodotto dalla sorgente.

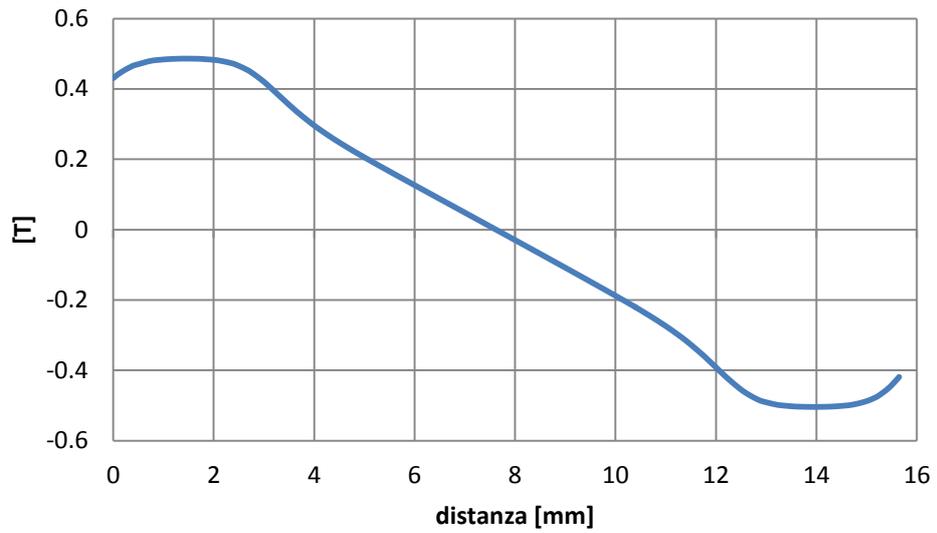


Figura 4.11 – Induzione al traferro (linea L1).

In Figura 4.12, invece, è diagrammata l'induzione prodotta dal magnete e calcolata nella linea di mezzeria M1. Anche qui, il suo valore medio è maggiore di quello ipotizzato precedentemente motivo per cui il magnete (nel caso reale e non più considerato a parametri concentrati) si trova ad erogare più flusso, a parità di superficie, per compensare le dispersioni, le perdite, ecc.

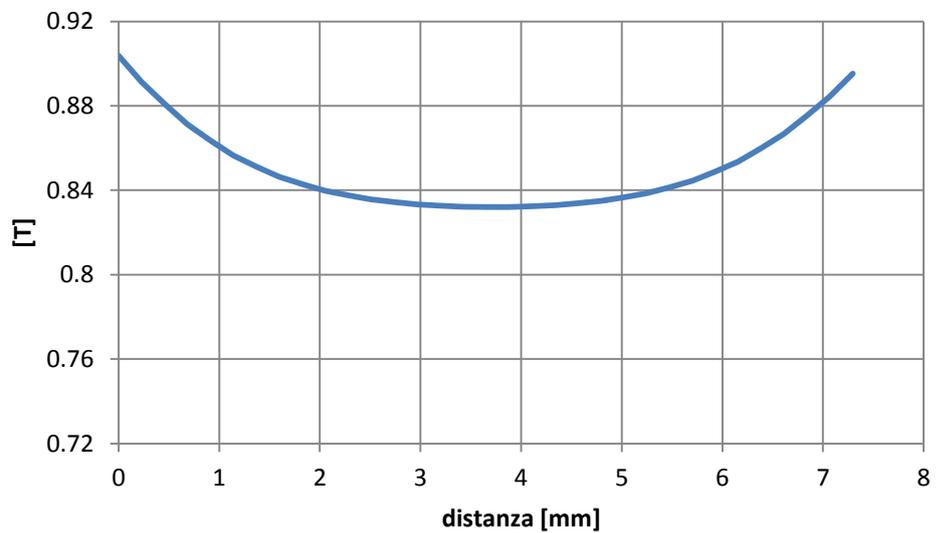


Figura 4.12 – Induzione del magnete calcolata sulla linea M1.

#### 4.6 Validazione efficacia della compensazione di forza verticale della configurazione ibrida magnete-bobina

L'obiettivo principale del progetto è quello di adibire al solo magnete la stabilizzazione in senso verticale della forza peso del volano. Qualora per qualsiasi motivo di natura interna o esterna al sistema, vi fosse uno squilibrio, deve essere presente un sistema che riporti la massa rotante nella posizione di equilibrio. A tal fine si è pensato di utilizzare, come primo caso di studio, una bobina atta a mettere in gioco una certa induzione al traferro di tipo additiva o sottrattiva a quella prodotta dal magnete. In questo paragrafo si vuole capire se l'ausilio della bobina può correggere e come, il posizionamento verticale ed orizzontale del volano.

L'approccio implementato per la nuova configurazione deriva da quella descritta nel paragrafo 4.5 e di aggiungere una bobina di dimensioni tali per cui, teoricamente, siano tollerabili i valori di densità di corrente ( $r_c = 6 \text{ mm}$ ,  $NI_{max} = 2000 \text{ A}$ ,  $J_{max} \cong 17 \text{ A/mm}^2$ ).

Con corrente di bobina nulla, il bilancio elettrodinamico tra la forza dei magneti e della forza peso del volano non è garantito (compensazione di forza magnetica debole), a causa della parziale richiusura delle linee di flusso attraverso il fianco del volano. Le dimensioni del magnete e delle espansioni polari sono state ricalcolate con lo stesso metodo di ottimizzazione descritto nel paragrafo 4.5 con  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ . Le dimensioni della configurazione ottimizzata sono riportate in Tabella 4.4.

Tabella 4.4 – Parametri geometrici del sistema magnetico.

$l_m$ [mm]	4.6
$h_m$ [mm]	9.3
$\Delta R_o$ [mm]	2.0
$\Delta R_i$ [mm]	3.2

Il layout della bobina (in questo caso circolare ma può essere anche quadrata), è riportata nella Figura 4.13.

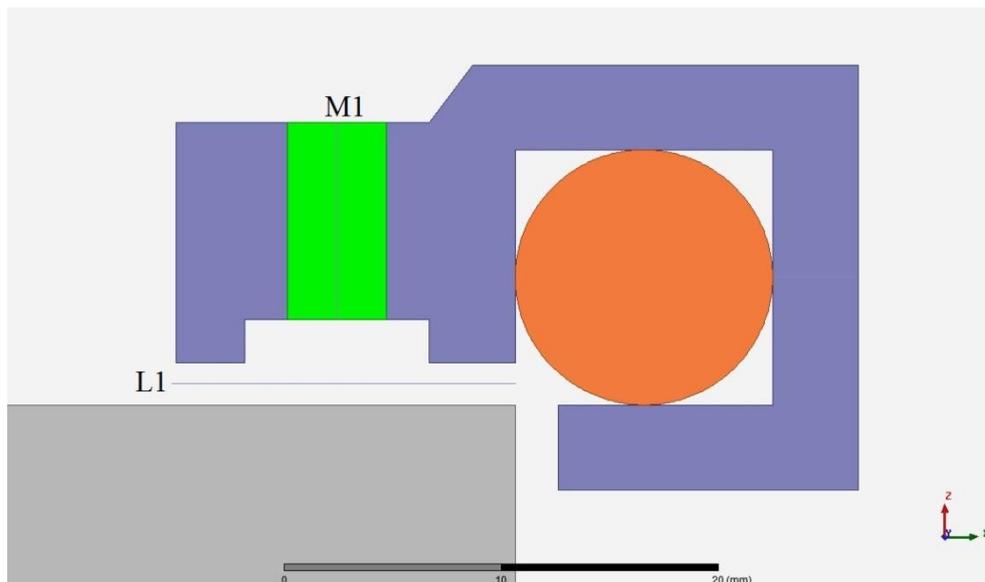


Figura 4.13 – Configurazione ibrida magnete e bobina.

Analizzando parametricamente la forza di attrazione magnetica agente nel volano rispetto la variazione del traferro ( $g^* = 2 \text{ mm}$ ), la variazione massima di forza che dovrebbe essere compensata dalla bobina, soprattutto nel caso più gravoso di riduzione di traferro (avvicinamento) è di circa 1500 Newton.

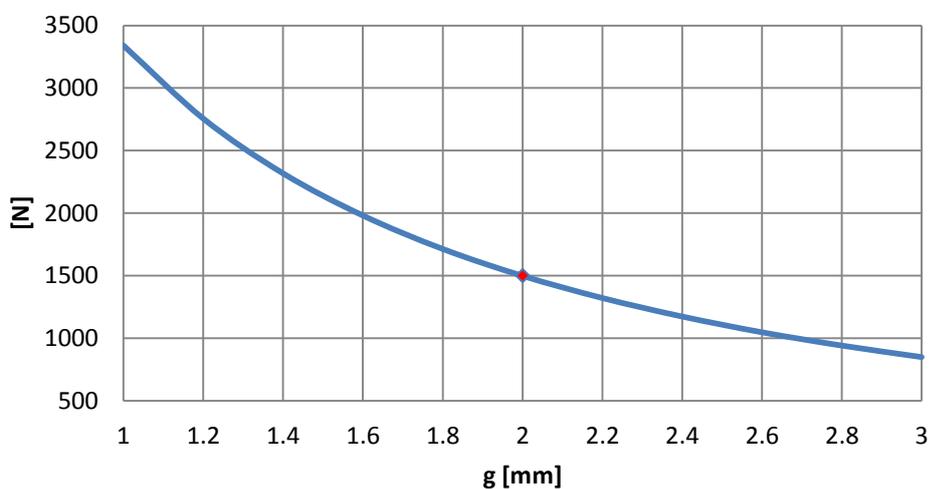


Figura 4.12 – Forza del magnete agente sul volano al variare del traferro.

Si ipotizzi ora di trascurare il magnete ( $H_c = 0$ ) e facendo lavorare solo la bobina di controllo si ottiene il grafico di Figura 4.13: risultato prevedibile dal momento che la forza magnetica  $F_m$  è proporzionale ad essa secondo la relazione (4.13).

$$F_m = \frac{B_g^2}{2\mu_0} S_g \quad (4.13)$$

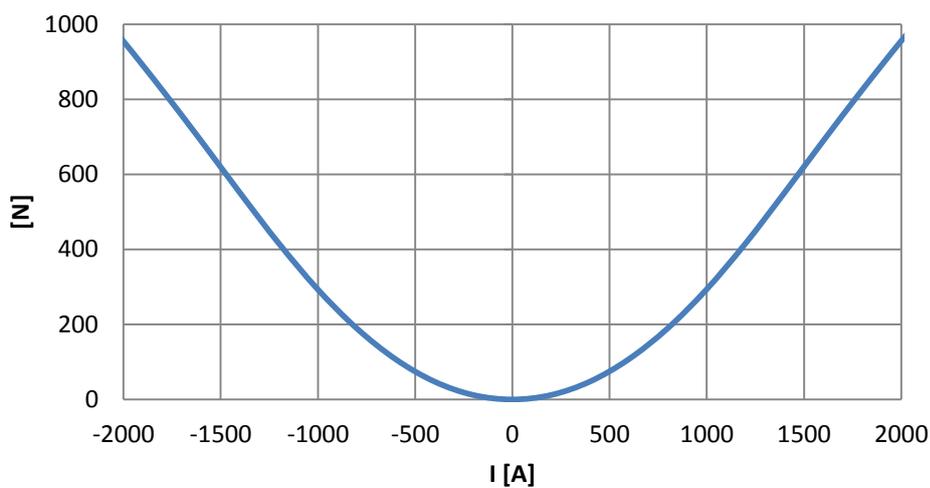


Figura 4.13 – Forza di attrazione della bobina in funzione della corrente nell'ipotesi di  $H_c = 0$  ( $g = 2 \text{ mm}$ ).

Tornando alla situazione con magneti “attivo” ( $H_c \neq 0$ ) e combinando ora i due sottosistemi (magnete e bobina) non si ottiene il risultato sperato. Qualunque sia il verso della corrente erogata, l’induzione al traferro sotto una delle due espansioni polari subisce un incremento mentre nell’altra espansione una diminuzione, non permettendo quindi una regolazione efficace (Figura 4.14).

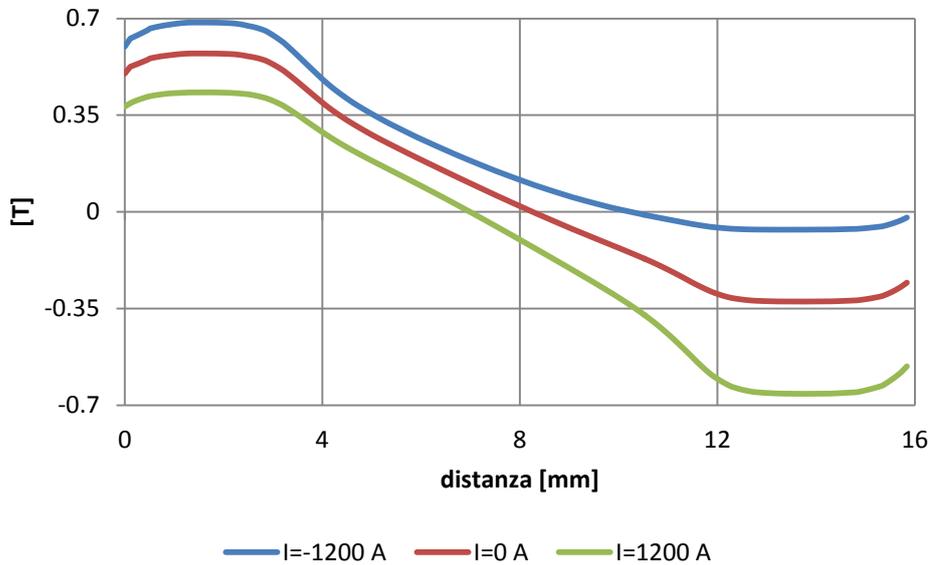


Figura 4.14 – Componente d’induzione al traferro di asse  $z$  ( $g = 2 \text{ mm}$ ).

Fissato il traferro, la forza esplicita globalmente dal cuscinetto, per diversi valori di corrente, è sempre di tipo additivo rispetto il valore di forza nominale di levitazione.

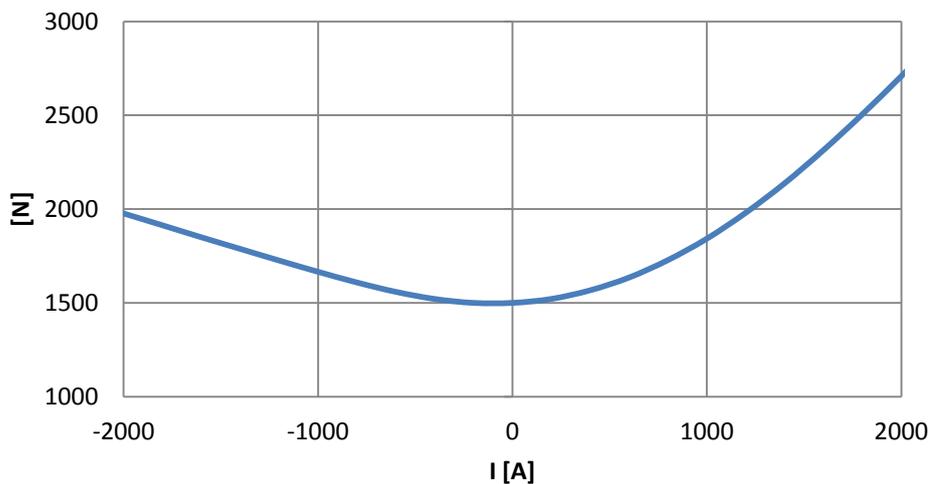


Figura 4.15 – Andamento forza esercitata sul volano al variare della corrente di controllo ( $g = 2 \text{ mm}$ ).

Un esempio del contributo additivo della bobina all'induzione al magnete, con corrente positiva è riportato in Figura 4.16 in cui è ben visibile un rafforzamento del campo d'induzione magnetica sotto l'espansione polare più esterna nel bordo del volano.

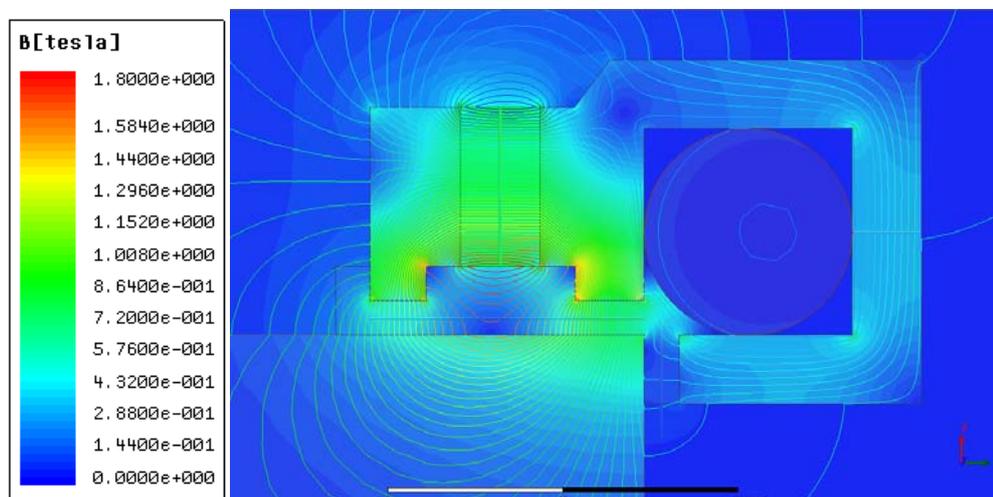


Figura 4.16 – Analisi FEM del campo magnetico indotto con corrente di bobina  $I = 1200$  A.

#### 4.7 Validazione efficacia della compensazione di forza radiale della configurazione ibrida magnete-bobina

Come conseguenza dell'impossibilità di ottenere una configurazione di cuscinetto magnetico compatto con annessa la bobina per il controllo verticale e radiale di forza, si è pensato di disaccoppiare i due sistemi (magnete e bobina) in modo da renderli del tutto indipendenti. Dunque il sistema composto dai due magneti lavora sempre per sostenere verticalmente la forza peso del volano. A differenza della configurazione descritta nel paragrafo 4.6, sono ora presenti due bobine, ciascuna destinata al controllo attivo di posizionamento verticale e radiale della massa rotante, poste rispettivamente lungo il bordo esterno del volano e alloggiata una superiormente ed una inferiormente ad esso (Figura 4.17).

Per quanto concerne il dimensionamento del magnete e delle espansioni polari in termini di volume, la loro parametrizzazione è ora vincolata al bordo interno della superficie del volano (sviluppo della geometria a raggio medio inferiore). Nonostante ciò, le dimensioni degli sviluppi radiali fa sempre capo al soddisfacimento della funzione obiettivo (4.13) con i parametri  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ . I risultati dell'ottimizzazione sono riportati in Tabella 4.5.

Tabella 4.5 – Parametri geometrici del sistema magnetico.

$l_m$ [mm]	3.5
$h_m$ [mm]	8.9
$\Delta R_o$ [mm]	8.6
$\Delta R_i$ [mm]	9.2

Il layout complessivo del sistema è riportato in Figura 4.17.

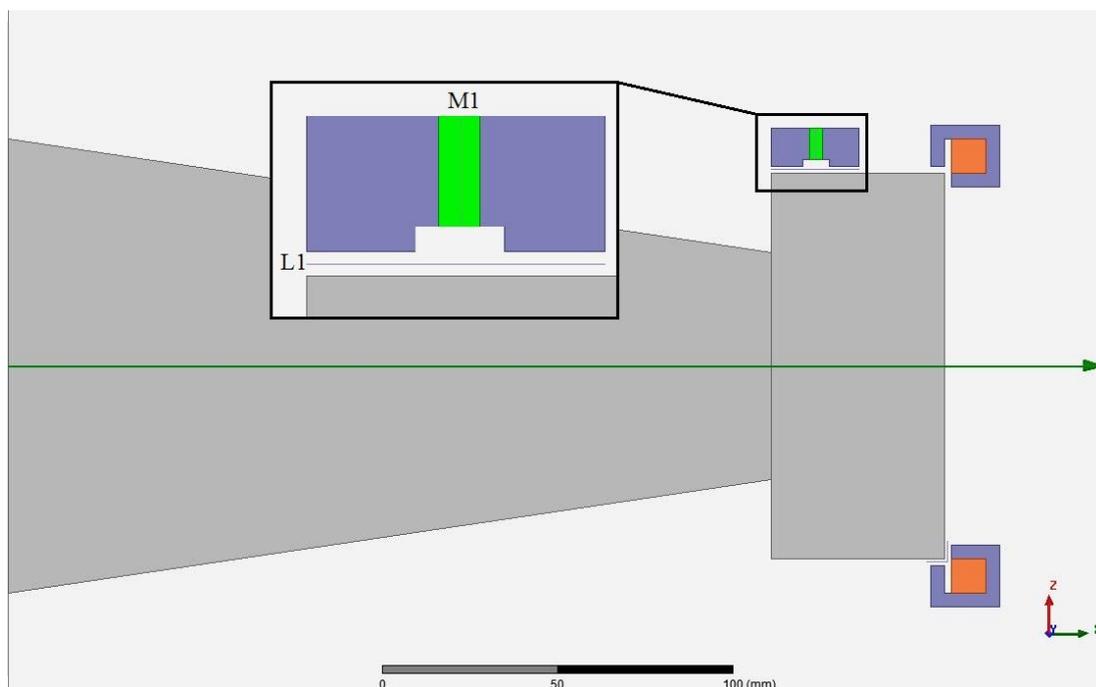


Figura 4.17 – Configurazione ibrida “separata”.

Anche con questa configurazione del sistema, sono state diagrammate gli andamenti dell’induzione al traferro lungo la linea L1 (Figura 4.18) e quella prodotta dal magnete (Figura 4.19). La prima mette in luce che i valori di induzione sono abbastanza bassi rispetto le ipotesi preliminari, sinonimo di superfici delle espansioni polari sovra stimate da parte del calcolatore. La figura successiva, invece, evidenzia che il valore medio dell’induzione prodotta dal magnete è pressoché coincidente ai 0.8 T ipotizzati.

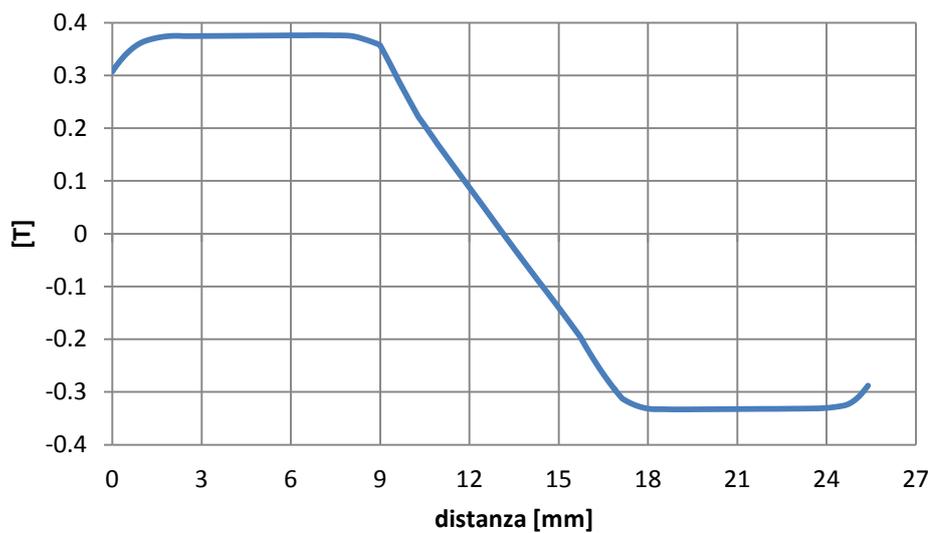


Figura 4.18 – Induzione al traferro (linea L1).

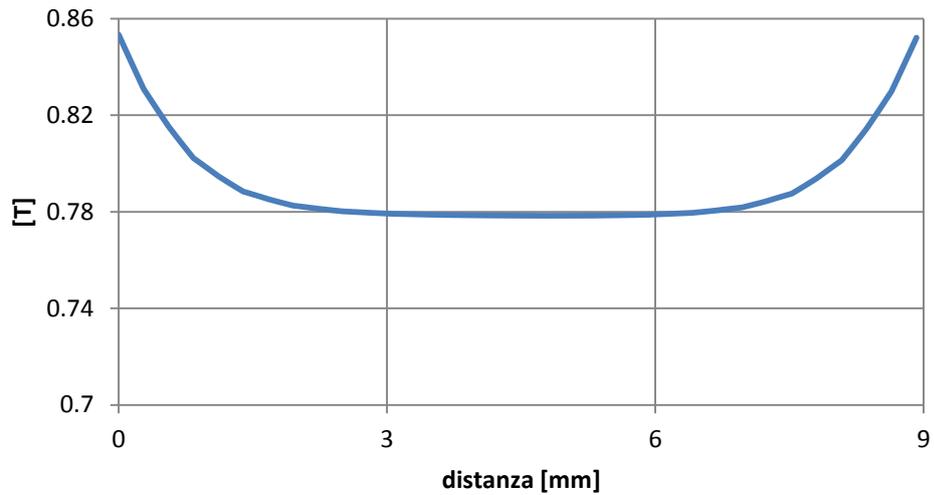


Figura 4.19 – Induzione del magnete (linea M1).

Particolarmente interessante è ricercare il valore di corrente totale [A\*spire] da far circolare nelle bobine per riportare il volano nella condizione di equilibrio delle forze. Pertanto, nel sistema di riferimento  $rz$ , è stata condotta un'analisi "passo a passo" di ricerca di tale valore di corrente per diversi valori di traferro  $g$ .

In Figura 4.18: la curva blu fa riferimento alla corrente della bobina posta sotto al volano (di richiamo quando il volano si avvicina al magnete soprastante) mentre la curva rossa si riferisce alla corrente della bobina superiore. L'andamento è dissimmetrico e con pendenza maggiore nel caso di azione di controllo della bobina inferiore perché quando il volano si avvicina al sistema di levitazione superiore (il traferro  $g$  diminuisce) la bobina deve esplicare una forza tale da, non solo compensare gli effetti dinamici della massa, ma anche per compensare l'azione di forza attrattiva dei magneti.

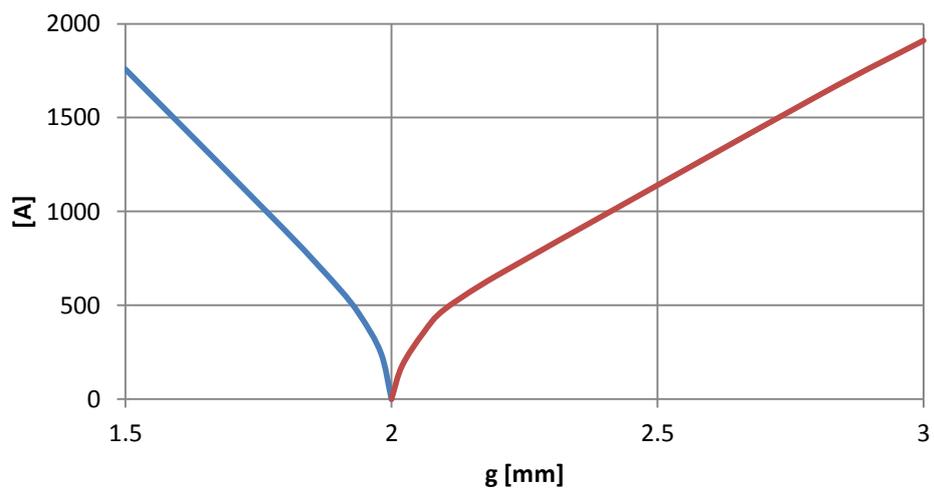


Figura 4.18 – Corrente di bobina in funzione della variazione di traferro: corrente di bobina sopra (linea rossa), corrente di bobina sotto (linea blu).

La compensazione di forza in termini di corrente totale circolante in bobina è evidentemente più pesante per la bobina inferiore, a parità di variazione di traferro  $\Delta g$  rispetto  $g^* = 2 \text{ mm}$ .

A questo punto però, per verificare l'entità del contributo di forza radiale da parte delle bobine di controllo quando operano una correzione di posizione verticale del volano è necessario modellizzare il sistema nel riferimento spaziale decentrato  $xy$ . In questo, è dunque effettuata un'analisi parametrica delle forze agenti sul volano al variare del traferro. Si nota che:

- Le forze di asse  $z$  (riferimento  $rz$ ) e quelle di asse  $y$  (riferimento  $xy$ ) differiscono di un fattore  $k = 2\pi r_m$  il quale tiene conto dello sviluppo a simmetria radiale della geometria del volano, con  $r_m$  raggio medio di applicazione delle forze.

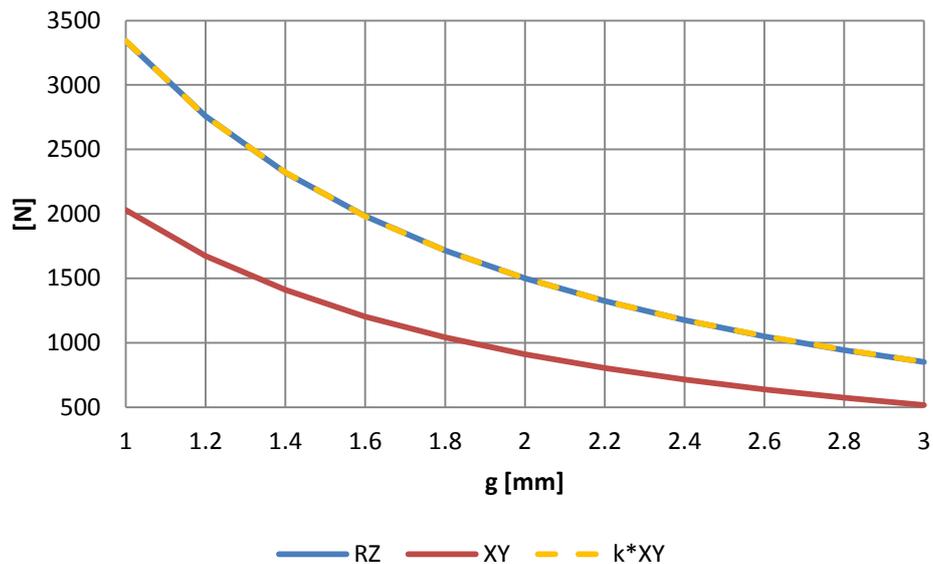


Figura 4.19 – Comparazione forze nei sistemi di riferimento  $rz$  e  $xy$ .

- La componente di forza radiale, a seguito delle variazioni verticali di traferro e delle rispettive correnti di compensazione, non è trascurabile. Ciò detto è particolarmente critico perché qualora il sistema fosse nella corretta posizione di riferimento radiale ma non in quella verticale, la correzione di quest'ultima comporta uno squilibrio della prima. L'entità della spinta radiale è visibile in Figura 4.20.

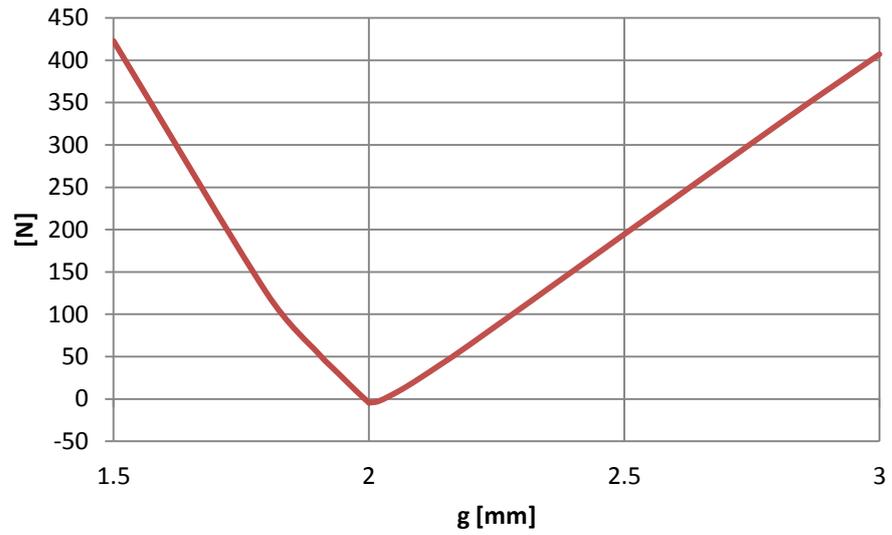


Figura 4.20 – Componente di forza di asse  $x$  applicata al volano al variare del traferro ( $y$ ).

In conclusione, i sistemi di controllo di forza radiale e verticale non possono essere integrati in un unico dispositivo e quindi la configurazione del cuscinetto magnetico deve essere rivisitata. Inoltre, per rendere più semplice ed efficiente l'intero sistema, è bene che i due suddetti controlli siano realizzati l'uno in modo indipendente dall'altro.



## 5. Progettazione del modello integrato

Al fine di ovviare ai problemi legati alla configurazione ibrida delineati nel capitolo precedente, si è optato per lo sviluppo di un sistema integrato composto da due anelli magnetici, posti nelle estremità interna ed esterna del bordo del volano, e da due bobine di controllo indipendenti, una superiormente (tra i due magneti) e l'altra inferiormente il volano.

I materiali utilizzati per ciascuno dei componenti rimangono invariati, come descritti in 4.2.

### 5.1 Dimensionamento dei magneti

Come preannunciato, gli anelli magnetici sono ora posti rispettivamente lungo la periferia interna ed esterna della superficie del bordo del volano, dimensionati in modo che, ciascuno di essi, contribuisca alla sospensione gravitazionale di metà forza peso (circa 750 N). Così facendo, per variazioni di traferro (di asse  $z$ ), i contributi di forza radiale messi in gioco dai due anelli magnetici si compensano l'un l'altro.

Ogni anello magnetico è dimensionato a sé stante mediante il processo di minimizzazione dei volumi di materiale, ovvero della "Funzione Obiettivo" (4.13), con coefficienti  $\alpha_1 = 0.8$  e  $\alpha_2 = 0.2$  (numero massimo di iterazioni pari a 150, metodo numerico SNLP) in modo da privilegiare l'ottimo volumetrico dei magneti rispetto i volumi di materiale ferromagnetico. Per quanto riguarda la parametrizzazione dei volumi del sistema magnetico interno ed esterno, essi sono stati vincolati rispettivamente ai raggi  $R_i$  e  $R_o$  in modo da lasciare quanto più spazio disponibile per la bobina di controllo ivi compresa. Come primo risultato dell'ottimizzazione, le dimensioni delle espansioni polari ottenute non sono tali da consentire l'alloggiamento di una bobina tra i due anelli perché di eccessivo sviluppo radiale. I risultati ottenuti dallo studio della funzione  $f_{ob}$ , per ciascuno dei due magneti, sono riportati rispettivamente in Figura 5.1 e 5.2.

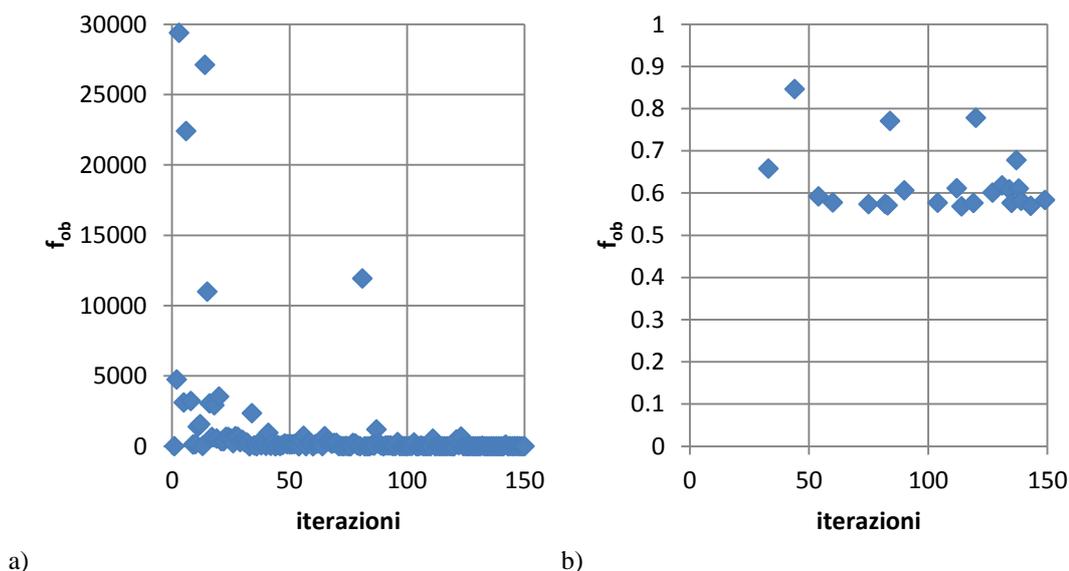


Figura 5.1 – Risultati dell'ottimizzazione della funzione obiettivo per il magnete interno. a) risultati globali; b) intervallo di interesse della funzione.

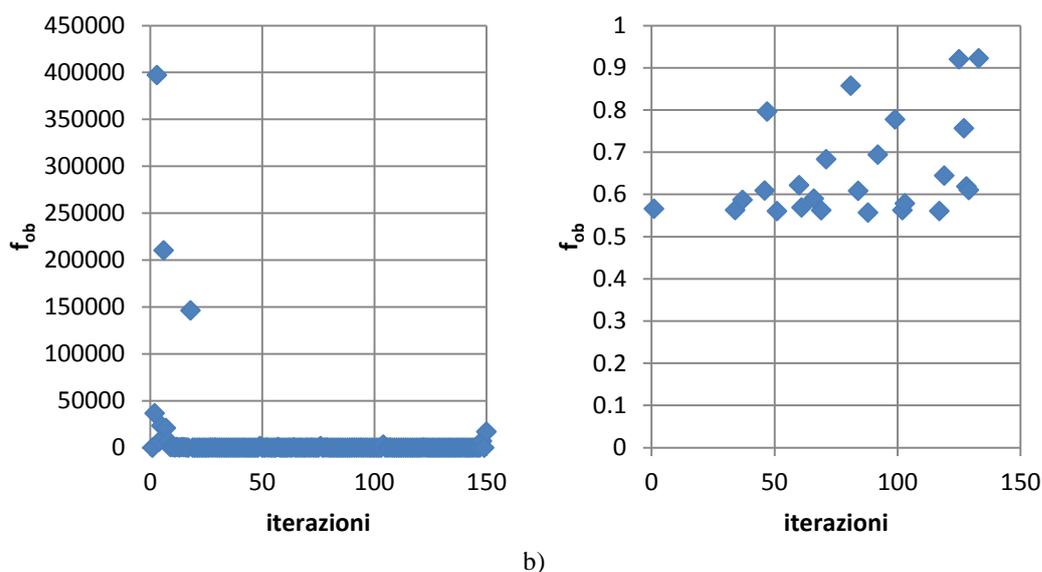


Figura 5.2 – Risultati dell’ottimizzazione della funzione obiettivo per il magnete esterno. a) risultati globali; b) intervallo di interesse della funzione.

In entrambi i casi, si nota che solo alcune iterazioni hanno portato alla corretta minimizzazione (a valore in cui  $0 \leq f_{ob} \leq 1$ ), più precisamente per valori compresi tra 0.5 e 0.6. Oltretutto, l’ampiezza della componente normale dell’induzione al traferro è minore del valore precedentemente ipotizzato. Si è pensato allora di ridurre le superfici delle espansioni polari (a parità di flusso) ed è stato applicato il “Criterio del pareggio delle aree” a tali superfici, fissato  $\Delta R_{o,ext} = 2 \text{ mm}$ . Il pedice “ext” indica che si fa riferimento al sistema magnetico situato nel bordo esterno del volano (pedice “int” per quello interno).

Le dimensioni finali, approssimate sono riportate nella Tabella 5.1.

Tabella 5.1 – Parametri geometrici dei sistemi magnetici di sospensione.

	Sistema “magnete interno”	Sistema “magnete esterno”
$l_m$ [mm]	3	3
$h_m$ [mm]	9	8.55
$\Delta R_i$ [mm]	2.43	2.07
$\Delta R_o$ [mm]	2.33	2
$h_{Fe,m}$ [mm]	2	2
$\Delta R$ [mm]	2	2

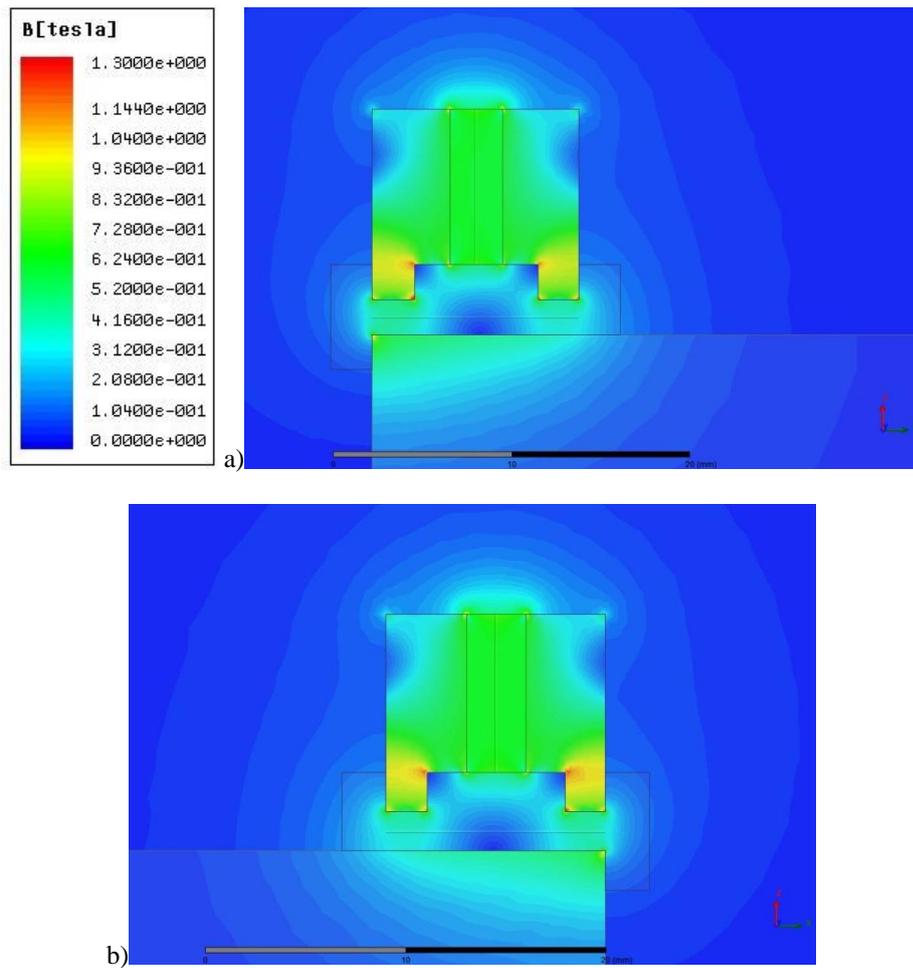


Figura 5.3 – Andamenti dell’induzione nei particolari dei sistemi magnetici: a) magnete “interno”;  
b) magnete “esterno”.

In Figura 5.3 è visibile un esempio dell’analisi FEM nei due sistemi magnetici, in particolare il campo  $\mathbf{B}$  nelle condizioni di traferro  $g = g^* = 2 \text{ mm}$ . Entrambi contribuiscono a sostenere metà forza peso del volano, senza particolari problemi legati a saturazioni nel materiale ferromagnetico.

Per ciascuna configurazione è stata svolta l’analisi parametrica della forza magnetica attrattiva agente sul volano in funzione della variazione di coordinata spaziale  $z$ . Accorpando le due soluzioni, nel valore di riferimento, si ottiene la compensazione e dunque l’equilibrio tra la forza peso e forza attrattiva dei magneti (Figura 5.4).

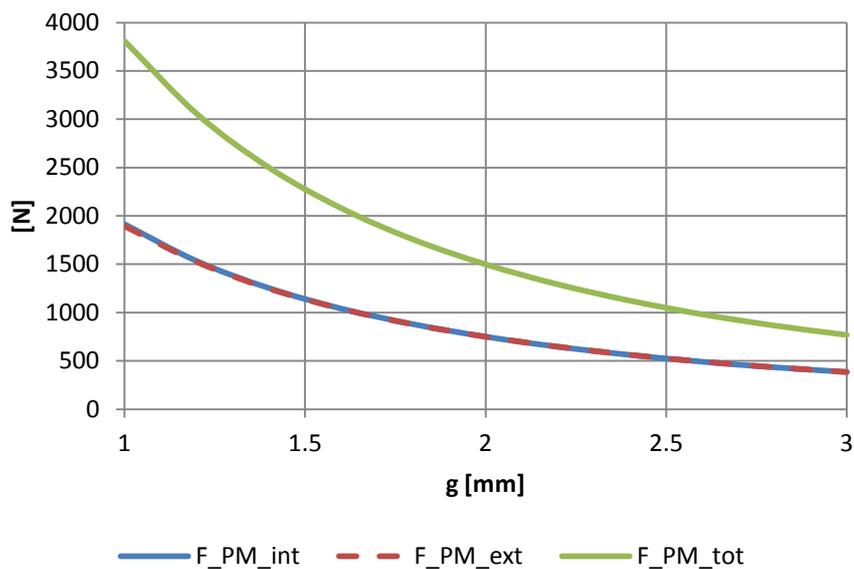


Figura 5.4 – Analisi parametrica della forza di attrazione dei magneti in funzione della variazione di traferro.

## 5.2 Dimensionamento delle bobine di controllo

Il cuscinetto magnetico proposto in questo capitolo incorpora un sistema di controllo della forza agente sulla massa rotante mediante bobine elettromagnetiche. Il passaggio di corrente nella bobina mette in gioco un'induzione al traferro e dunque una forza attrattiva. Data l'impossibilità di utilizzare una sola bobina posta superiormente al volano per imprimere forze attrattive e repulsive, il sistema è composto da un totale di due bobine: una sopra ed una sotto il volano. Le correnti saranno indicizzate con il pedice "cp" e "cn" per indicare la corrente della bobina superiore ed inferiore rispetto il volano (CP= Coil Positive; CN=Coil Negative). Si ricorda che: per prima cosa vi è un aggravio dimensionale della bobina inferiore dato che deve controbilanciare, non solo la dinamica del volano, ma anche la forza dei magneti; in secondo luogo vi è la necessità di dimensionare la bobina superiore considerando lo spazio compreso tra i due anelli magnetici. Dunque, per semplicità, si è scelto di dimensionare allo stesso modo le due bobine (in assenza dei magneti) sulla base della variazione di forza da applicare, rispetto la posizione di equilibrio di riferimento  $g^*$ , senza l'onere di un dimensionamento differenziato.

In questa applicazione, il controllo di traferro è associato a quello di corrente. Esso deve essere dinamicamente pronto, ovvero essere in grado di erogare una certa corrente in breve tempo, tempo di risposta dipendente dalle sollecitazioni in tensione che il convertitore di potenza deve tollerare (aspetto che non verrà trattato in questo elaborato). Dato il comportamento prevalentemente "pulsante" della corrente, si è scelto di fissare il valore limite istantaneo di densità di corrente a  $10 \text{ A/mm}^2$ .

Inoltre, sulla base del delta di forza da "fornire" al sistema per riportare il volano nella posizione di equilibrio (Figura 5.5), si sono valutate tre sezioni della bobina.

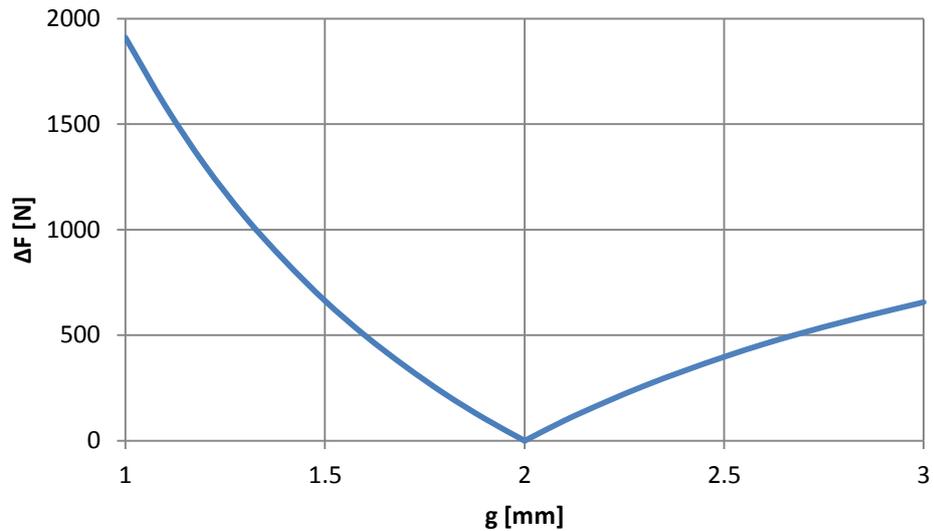


Figura 5.5 – Andamento della variazione di forza rispetto la condizione di traferro di riferimento.

In riferimento al valore limite di densità di corrente e al  $\Delta F$ , sono state appunto valutate tre ipotetiche sezioni (ipotesi di riempimento unitario):  $20 \times 5 \text{ mm}^2$ ,  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  e  $20 \times 10 \text{ mm}^2$ . Premessa l'analisi parametrica della forza agente sul volano al variare del traferro (Figura 5.4), per ciascuna sezione, è stata effettuata anche un'analisi parametrica della forza attrattiva al variare della corrente. Da queste si è potuto dedurre che:

- A parità di valore della sezione (sezione di  $100 \text{ mm}^2$ ) la geometria preferita è quella con sviluppo radiale maggiore di quello in altezza (di asse  $z$ ), cioè la  $20 \times 5$  è preferita alla  $10 \times 10$ . Ciò consegue minori dispersioni di flusso e maggiore contributo di forza a parità di corrente e traferro come conseguenza della minore riluttanza incontrata dal flusso nel circuito ferromagnetico (vedi Figura 5.6).
- Raddoppiando la sezione della bobina (da  $100 \text{ mm}^2$  a  $200 \text{ mm}^2$ ), a parità di densità di corrente, l'intervallo di traferro compensabile aumenta, utile soprattutto nel caso peggiore di riduzione del traferro, dove l'ampiezza della forza da compensare cresce con pendenza superiore rispetto il caso di aumento di traferro.

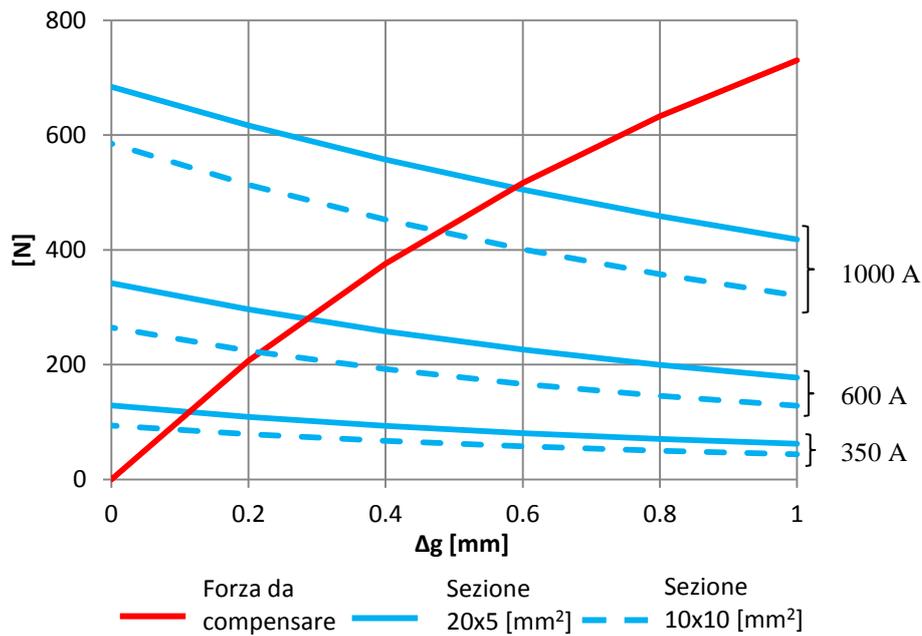


Figura 5.6 – Diagramma analisi parametrica forza in funzione della corrente della bobina superiore  $I_{cp}$ , al variare del traferro rispetto il valore di riferimento  $g^* = 2 \text{ mm}$ .

La scelta finale è stata quella di adottare la sezione 20x10 mm<sup>2</sup> dato che si è ipotizzato un coefficiente di riempimento unitario. In realtà, la bobina è realizzata con conduttori filiformi isolati tra loro con conseguente riduzione di circa il 20% della sezione utile.

La geometria e le quote della bobina sono riportate rispettivamente in Figura 5.7 e in Tabella 5.2.

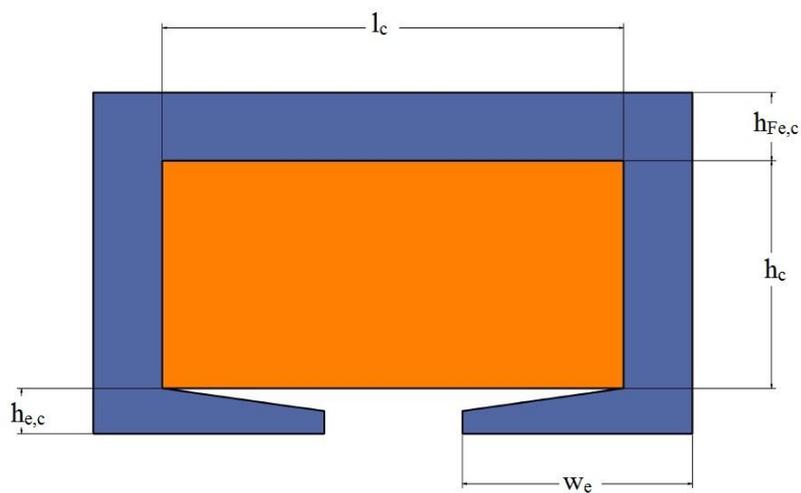


Figura 5.7 – Parametrizzazione del sistema bobina.

Tabella 5.2 – Parametri geometrici di ciascuna bobina di controllo.

$h_{Fe,c}$ [mm]	3
$h_c$ [mm]	10
$l_c$ [mm]	20
$h_{e,c}$ [mm]	2
$w_e$ [mm]	5

Di seguito sono riportate alcune immagini tratte dalla modellizzazione in Maxwell. In Figura 5.8 è possibile notare nel dettaglio l'infittimento della mesh nelle superfici in cui il calcolo dei campi e dei parametri magnetostatici devono essere più accurati.

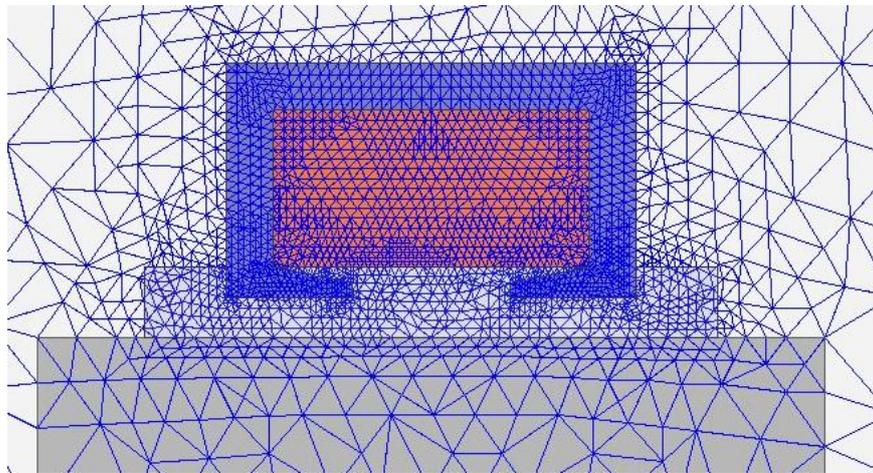


Figura 5.8 – Dettaglio della mesh nella bobina superiore.

### 5.3 Caratterizzazione dell'assieme

Nel paragrafo seguente è descritto nel dettaglio le caratteristiche del cuscinetto magnetico nella configurazione completamente integrata.

Dopo aver dimensionato separatamente le parti attive del cuscinetto e le singole componenti del sistema di sospensione, possono ora essere raggruppate in un unico modello (Figura 5.9 e 5.10). Nella prima figura citata è visibile il layout complessivo, mentre nella seconda, sono rappresentati i sistemi superiore ed inferiore del cuscinetto con parametrizzate le linee in cui sono successivamente calcolati e diagrammati gli andamenti delle grandezze di campo. Le dimensioni degli oggetti rimangono quelle riportate nelle tabelle presenti nel paragrafo precedente.

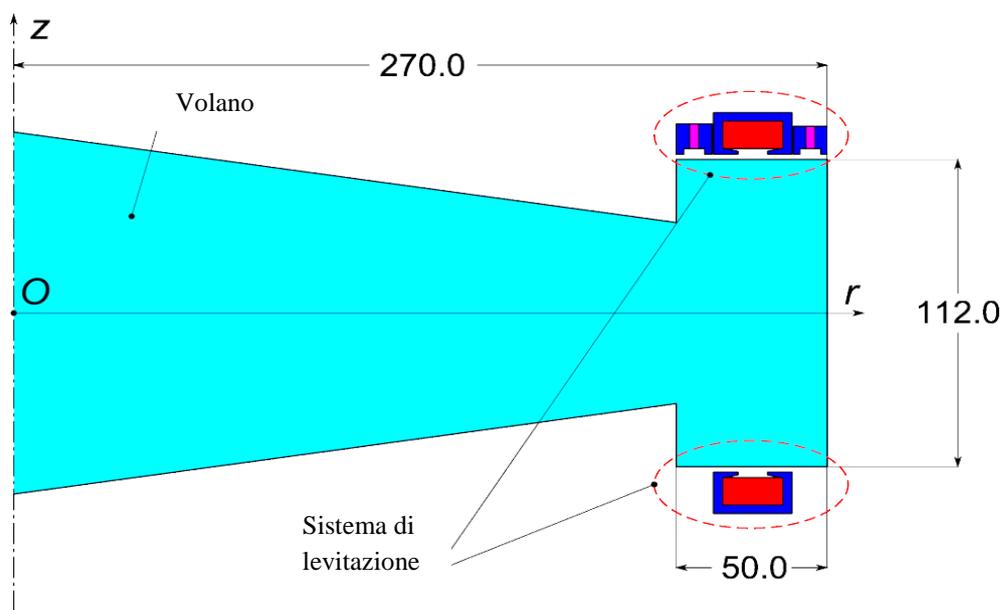


Figura 5.9 – Configurazione finale del cuscinetto magnetico e quote in mm.

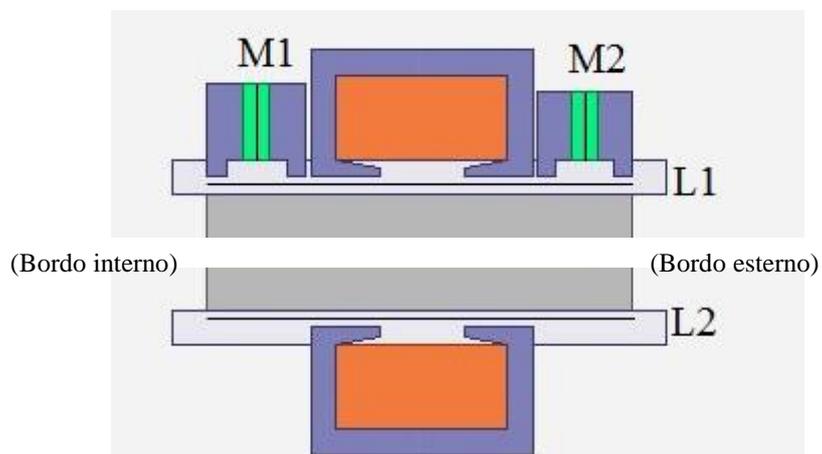


Figura 5.10 – Particolare del sistema di levitazione.

Di seguito, in Figura 5.11, sono riportati anche gli andamenti dell'induzione dei singoli magneti.

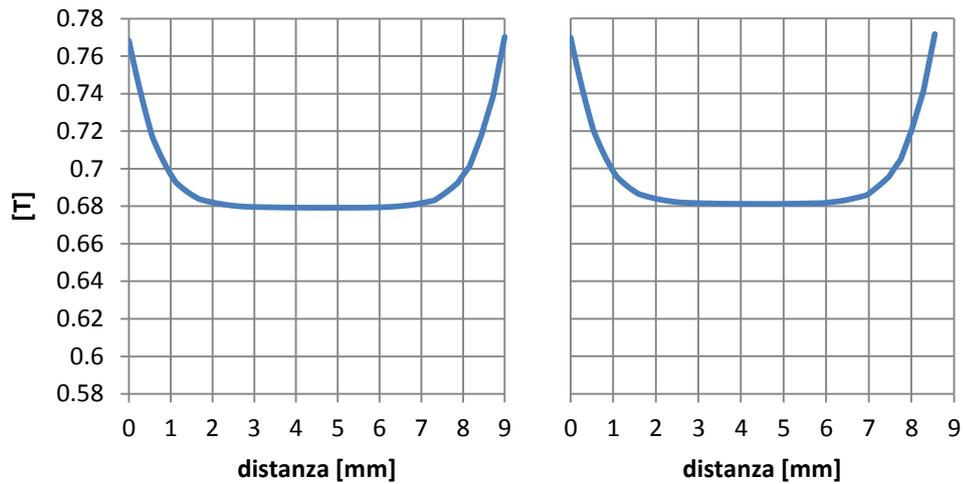


Figura 5.11 – Componente radiale dell'induzione in M1 (grafico di sinistra) e in M2 (grafico di destra).

Si noti come i due magneti lavorino in maniera del tutto simile con valore di induzione media prossima al valore ipotizzato inizialmente di 0.6 T, di circa 0.71 T. Il fatto che i due magneti abbiano comportamento del tutto simile, è di fondamentale importanza affinché sia garantita la stabilizzazione radiale al variare del traferro (e di conseguenza nessuna dipendenza tra spinta assiale e radiale).

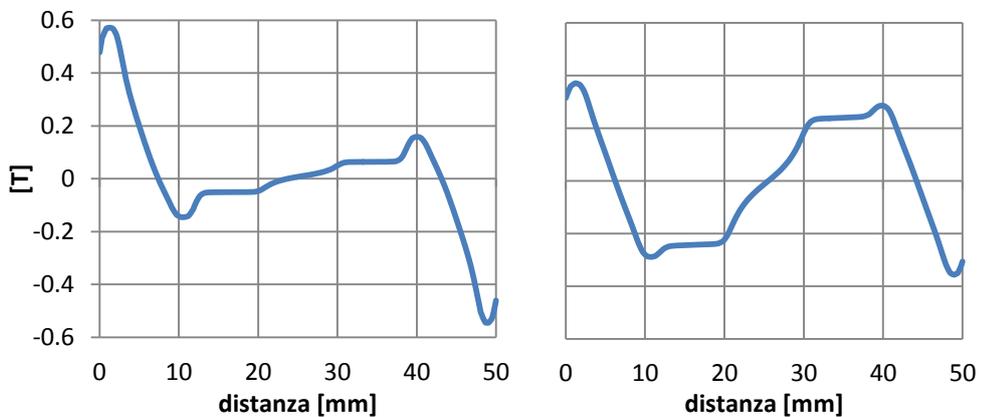


Figura 5.12 – Andamenti dell'induzione magnetica al traferro in L1. A sinistra vi è la situazione con traferro  $g = 2 \text{ mm}$  e correnti delle bobine nulle. A destra vi è la situazione con traferro  $g = 2.5 \text{ mm}$  e correnti  $I_{cp} = 990.4 \text{ A}$ ,  $I_{cn} = 0 \text{ A}$ .

Dal confronto di Figura 5.12 è visibile il contributo fornito dalla bobina in termini di induzione al traferro in confronto alla situazione di equilibrio elettrodinamico a correnti nulle. In particolare modo, magneti e bobina interferiscono tra loro apportando (in questo esempio) una diminuzione del campo prodotto nelle estremità della linea L1 ma un rafforzamento dello stesso nella zona di traferro che interfaccia la bobina.

In un altro esempio che segue, sono riportati gli andamenti qualitativi e quantitativi delle induzioni al traferro nel caso particolare di compensazione di forza ad opera della bobina inferiore, quando il valore di traferro è minore del riferimento e vale  $g = 1.375 \text{ mm}$ .

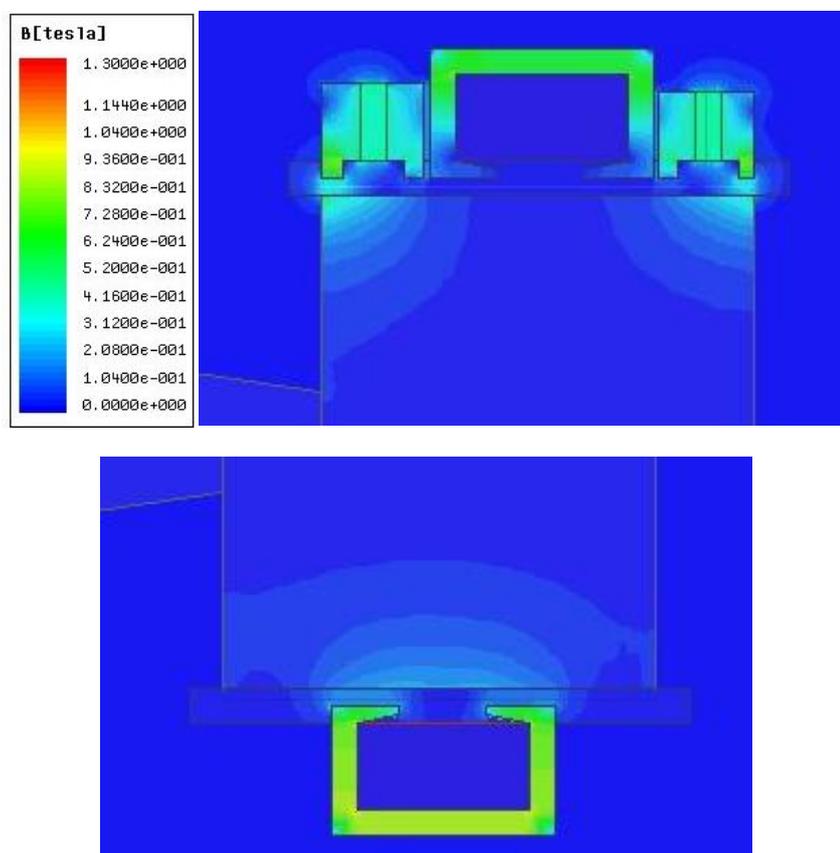


Figura 5.13 – Andamento dell'induzione magnetica, con traferro  $g = 1.375 \text{ mm}$  e correnti  $I_{cp} = 0 \text{ A}$ ,  
 $I_{cn} = 1807 \text{ A}$ .

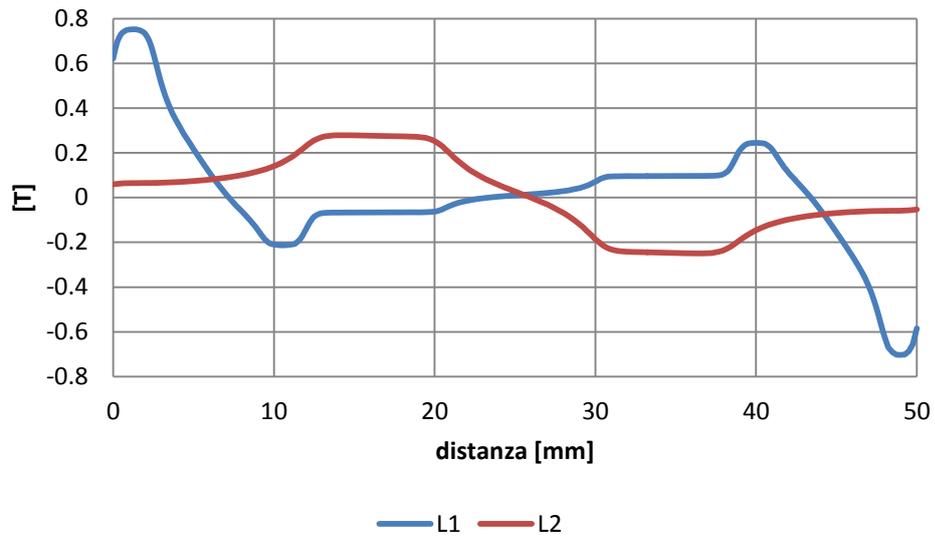


Figura 5.14 – Andamenti della componente di asse  $z$  dell'induzione al traferro, con traferro  $g = 1.375 \text{ mm}$  e correnti  $I_{cp} = 0 \text{ A}$ ,  $I_{cn} = 1807 \text{ A}$ .

La situazione particolare di Figura 5.13 non evidenzia regioni di materiale ferromagnetico soggetto a saturazioni indesiderate, nonostante il valore di corrente  $I_{cn}$  sia molto elevato.

Nell'immagine successiva (Figura 5.14) sono riportati gli andamenti quantitativi particolarizzati dell'induzione magnetica al traferro calcolate nelle linee L1 e L2 della configurazione del cuscinetto.

Premessa: la scelta del verso della corrente circolante nella bobina di controllo inferiore è ininfluente ai fini dello sviluppo di forza elettrodinamica.

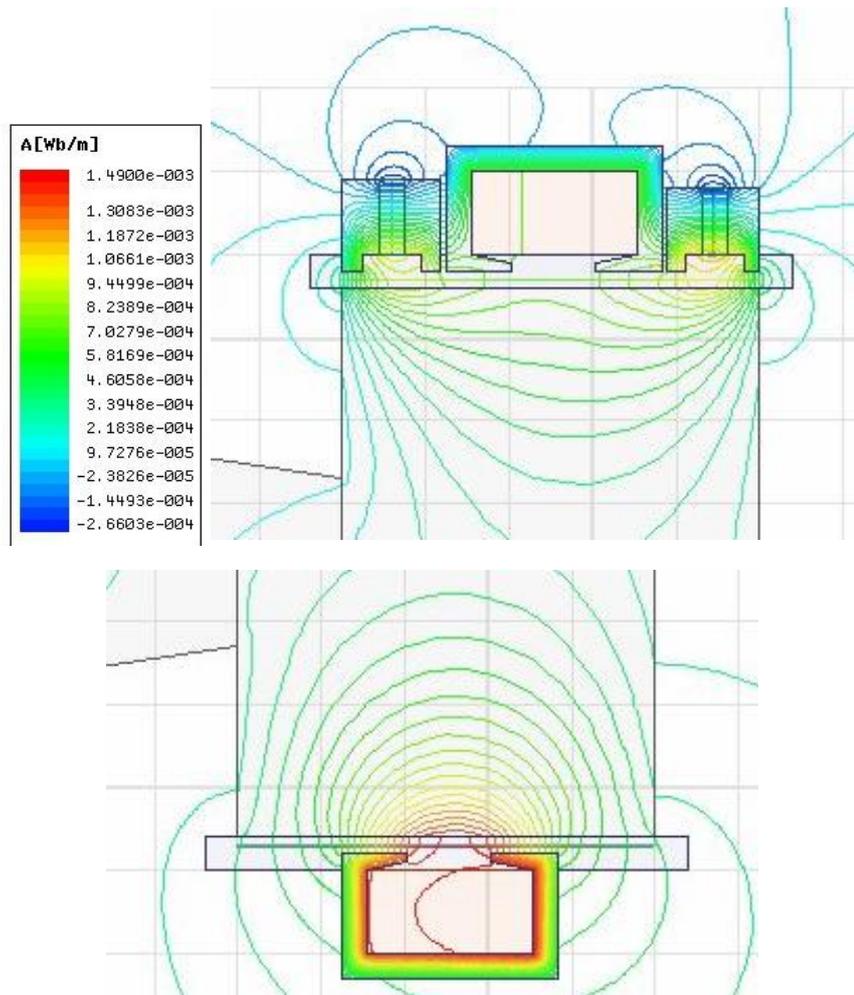
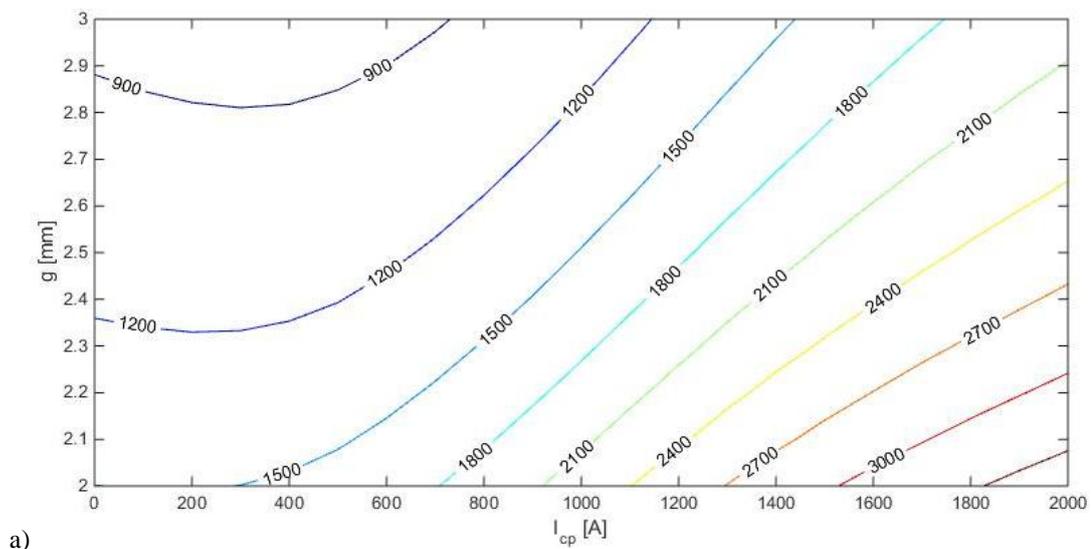
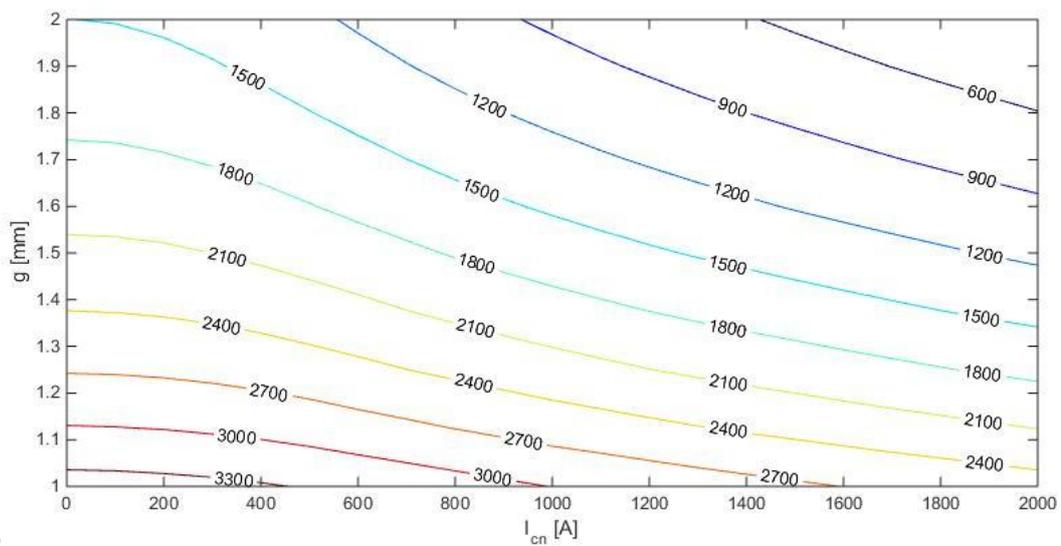


Figura 5.15 – Andamento flusso magnetico, con traferro  $g = 1.375 \text{ mm}$  e correnti  $I_{cp} = 0 \text{ A}$ ,  
 $I_{cn} = 1807 \text{ A}$ .

Quanto detto fin ora ci introduce nella fase cruciale della modellizzazione e cioè quella di capire qual è il valore di corrente da far circolare nella/e bobina/e (comunque il funzionamento contemporaneo delle due è da escludersi) quando il volano è perturbato dalla posizione di equilibrio (si faccia sempre riferimento alle sole variazioni verticali di asse  $z$ ). Attraverso l'analisi parametrica in due variabili condotta in Maxwell (forza dipendente dal traferro e dalla corrente), in Matlab si sono tracciati i diagrammi seguenti che legano le tre variabili di forza, traferro e corrente.



a)



b)

Figura 5.13 – (a) e (b) curve isovalore della forza [N] agente sul volano in funzione del traferro e rispettiva corrente di bobina.

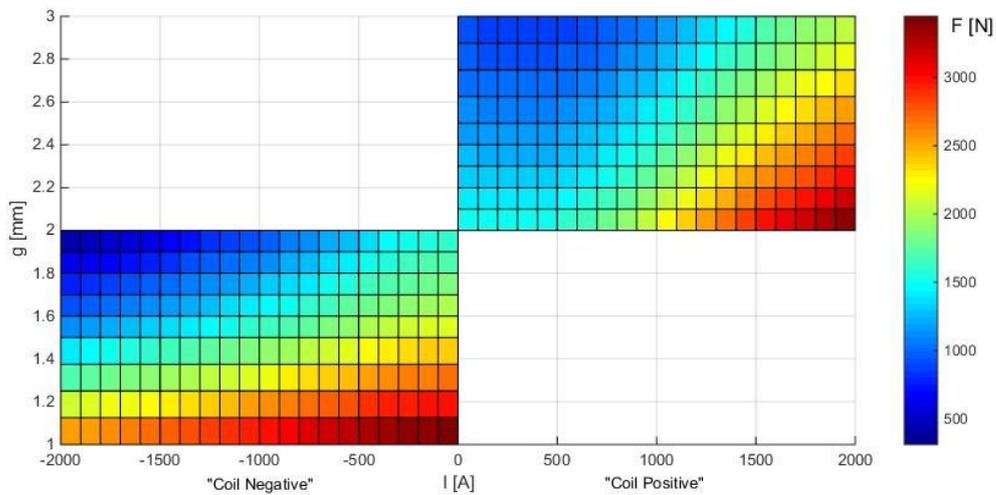


Figura 5.14 - Andamento della forza agente sul volano in funzione di traferro e correnti delle bobine.

## 5.4 Caratterizzazione del modello al variare della temperatura

A questo punto del lavoro si è pensato di rendere più realistica la modellizzazione e studiare il cuscinetto magnetico nell'ipotesi di variazione delle prestazioni dei magneti, prestazioni che sono strettamente dipendenti dalla temperatura dell'ambiente del locale in cui si trovano o legate ad un'azione prolungata della bobina di controllo. L'ipotetico intervallo spazia da 20°C a 80°C.

Per modellizzare il suddetto comportamento si è pensato di applicare alla curva  $B = f(H)$  un coefficiente di variazione di  $B_r$  ed  $H_c$  con la temperatura:  $k_{B_r} \cong -0.333 \left[ \frac{\%}{\Delta(^{\circ}C)} \right]$  con  $\mu_r$  costante, temperatura di riferimento  $\vartheta^* = 20^{\circ}C$ .

Grazie all'analisi parametrica condotta in Maxwell, sono state tracciati gli andamenti della forza agente sul volano in funzione della variazione di traferro, per diversi valori percentuali dell'indice di prestazione.

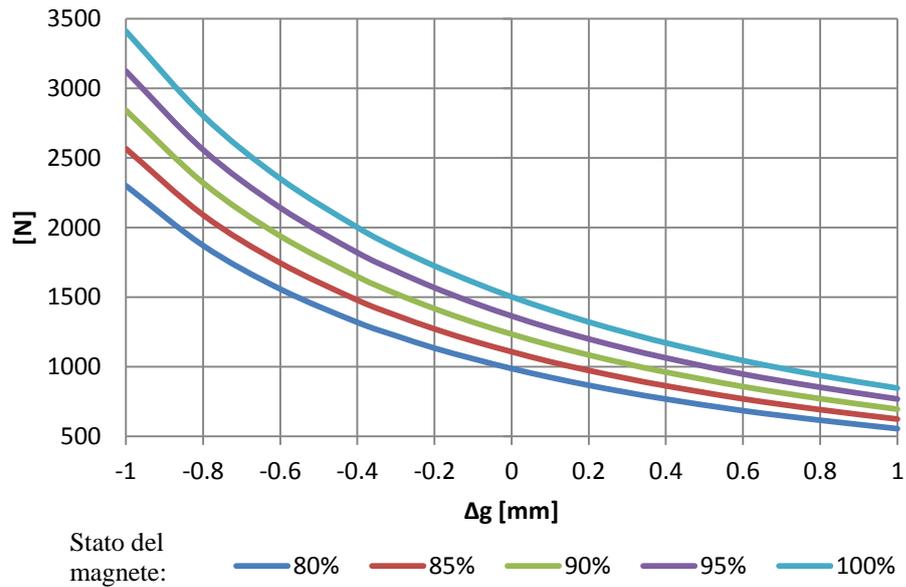


Figura 5.15 – Analisi parametrica in funzione della variazione di traferro  $\Delta g$  rispetto il riferimento  $g^* = 2 \text{ mm}$ , per diversi valori dell'indice di prestazione dei magneti.

Il declassamento dei magneti comporta, a parità di traferro, una riduzione della forza agente nel volano. Per garantire la sospensione del volano solo mediante la forza di levitazione dei magneti permanenti (cioè sfruttare il sistema in modo efficiente a correnti di controllo nulle) il riferimento di traferro deve variare e dunque diminuire all'aumentare della temperatura. In altre parole, si fanno lavorare i magneti, più vicini al volano in modo che la forza di compensazione sia sempre di 1500 N corrispondenti alla forza peso imposta.

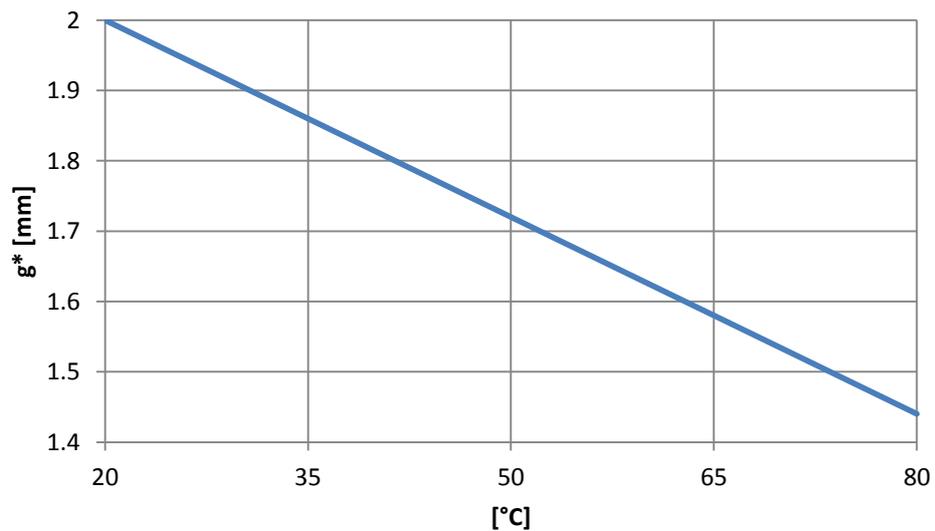


Figura 5.16 – Andamento del riferimento di traferro in funzione delle condizioni operative dei magneti.

In riferimento all'equazione (4.9), con  $\Delta = 0$  e  $F_m = 1500 \text{ N}$ , l'andamento di Figura 5.16 dimostra come il valore di riferimento di traferro varia linearmente con il degrado prestazionale dei magneti (da 0 al 20%).

Una rappresentazione più articolata mostra tridimensionalmente la forza agente sul volano, nel caso di magneti in condizioni "High Performance" a  $B_{r,max}$  e "Low Performance" a  $B_{r,min}$ .

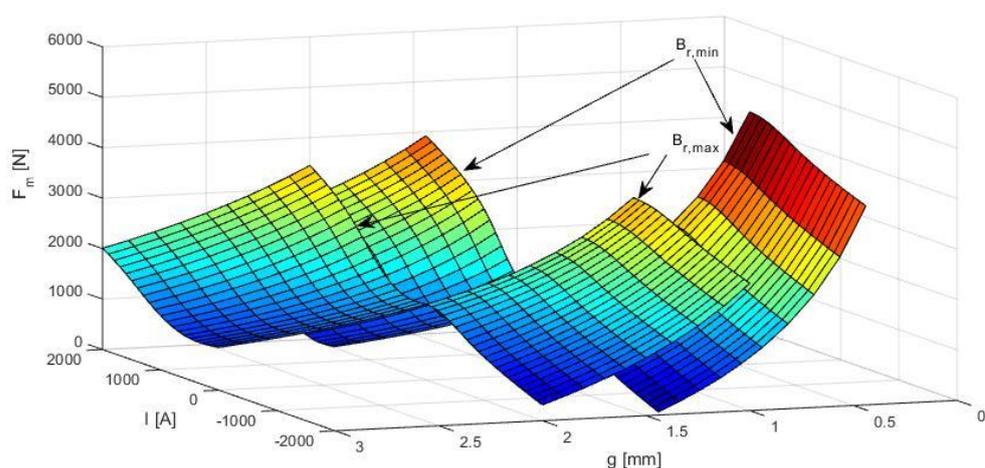


Figura 5.17 – Diagramma 3D della forza agente sul volano in funzione della corrente di controllo e del traferro.

## 5.5 Calcolo dell'induttanza delle bobine

Al fine del successivo studio della dinamica del cuscinetto magnetico è necessario conoscere l'induttanza delle bobine di controllo. Mediante codice FEM è stato possibile estrarre, per ogni condizione di funzionamento, i valori delle auto e mutue induttanze di entrambe le bobine.

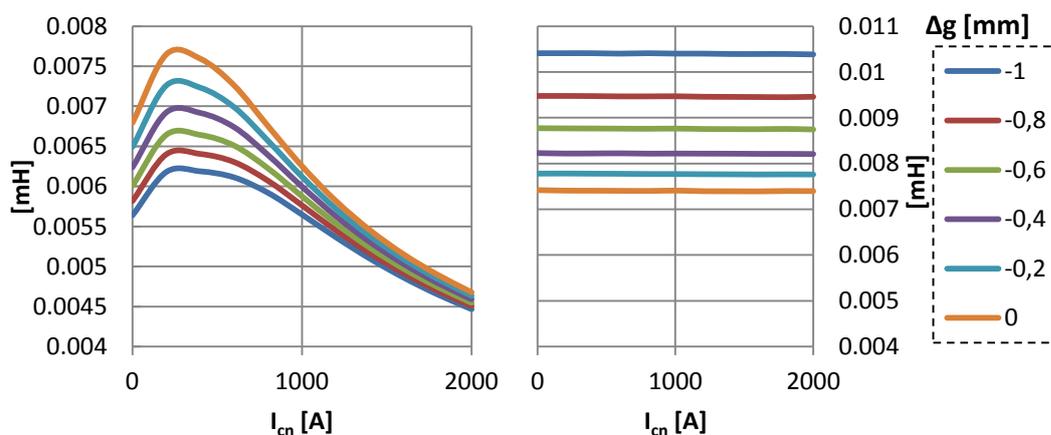


Figura 5.18 – Andamenti induttanze  $L_{22}$  (a sinistra) e  $L_{11}$  (a destra) rispettivamente della bobina inferiore e superiore al volano, in funzione della corrente, per diversi valori relativi di traferro ( $g^* = 2 \text{ mm}$ ).

Si consideri i diagrammi di Figura 5.18. L'azione di controllo avviene da parte della bobina sita inferiormente il volano. L'induttanza  $L_{11}$  si presenta andamento pressoché costante e di valore più elevato rispetto  $L_{22}$ , indice che la quota parte di flusso che attraversa il circuito magnetico della bobina superiore è quello prodotto dai vicini magneti e che effettivamente  $I_{cp}$  è prossima allo zero. Dall'altro lato  $L_{22}$  evidenzia un andamento non lineare dovuto al nucleo ferromagnetico di richiusura del flusso.

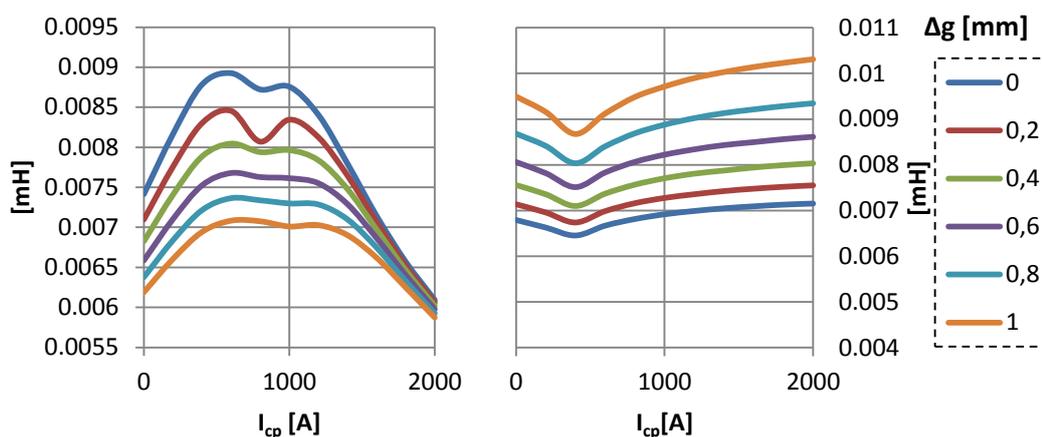


Figura 5.19 - Andamenti induttanze  $L_{11}$  (a sinistra) e  $L_{22}$  (a destra) rispettivamente della bobina superiore ed inferiore al volano, in funzione della corrente, per diversi valori relativi di traferro ( $g^* = 2 \text{ mm}$ ).

Si consideri ora la Figura 5.19. L'azione di controllo avviene mediante la bobina posta superiormente il volano. Diversamente da quanto esposto per la Figura 5.18, vi è che entrambe le induttanze non presentano andamento lineare né tantomeno costante. Oltre ciò vi è la singolare presenza di ondulazioni indesiderate dei valori di  $L_{11}$  e  $L_{22}$  (possibile causa: errore computazionale del processo di soluzione).

Concludendo:

- i diagrammi riportati evidenziano gli andamenti delle sole auto induttanze, in quanto non ha senso calcolare le mutue visto che l'alimentazione delle bobine è separata. Ad ogni modo, per ogni valore di traferro e di corrente, le mutue induttanze valgono  $|M_{12}| = |M_{21}| \cong 0.00025 \text{ mH}$ , trascurabili rispetto le auto.
- Ritengo fondamentale ribadire che in linea di principio, il funzionamento delle bobine non avviene contemporaneamente. Pertanto al fine della caratterizzazione dinamica del modello, sarà importante considerare solo l'induttanza  $L_{11}$  quando il controllo è adibito alla bobina superiore e l'induttanza  $L_{22}$  quando il controllo di corrente è svolto dalla bobina inferiore.



## 6. Controllo di traferro

---

Nel seguente capitolo è presentato il controllo della sospensione del volano mediante il cuscinetto progettato nel capitolo precedente, nell'ipotesi che l'equilibrio delle forze radiali sia garantito da un sistema di controllo separato. Nel complesso si tratta semplicemente di un controllo di posizione verticale (di traferro) che comanda la corrente nelle bobine adibite allo scopo, cercando di limitare per quanto possibile le perdite complessive.

### 6.1 Introduzione a Simulink

Simulink è un software di simulazione dinamica in ambiente Matlab®, il quale consente la modellizzazione e analisi di sistemi dinamici di vario tipo (lineari, non lineari, continui o discreti). L'interfaccia GUI<sup>15</sup> dell'utente si presenta molto semplice ed intuitiva, lontana dalla logica di programmazione. Esso ingloba una ricca libreria di blocchi di lavoro per la simulazione di sistemi elettrici, meccanici, ecc.

La procedura di implementazione per lo studio della dinamica del modello risulta particolarmente semplice e, come appena accennato, molto intuitiva. Come primo passo si deve banalmente strutturare il modello per mezzo dei blocchetti di lavoro. La difficoltà maggiore risiede nella definizione dettagliata del singolo blocco (tempo di intervento, tempo di sincronizzazione, valori e/o funzioni dipendenti, ecc).

I risultati possono essere visualizzati in modo diretto con i blocchetti "Display" oppure "Scope" ove vi appaiono in funzione del tempo come se si osservasse un oscilloscopio, oppure memorizzandoli direttamente nel "WorkSpace" del Matlab o salvarli in un file.

### 6.2 Cenni teorici

Un dispositivo di controllo è un particolare sistema per l'elaborazione dell'informazione, destinato al controllo dei processi fisici. Le sue funzionalità principali sono quelle di controllo a ciclo chiuso del sistema (operazione di regolazione), elaborare i valori dei riferimenti, gestire eventuali allarmi ed anomalie, ecc.

Nel nostro caso particolare di cuscinetti magnetici attivi (AMB) consentono l'applicazione di forze originate da elettromagneti, controllate in retroazione, in associazione con altri dispositivi come sensori e amplificatori di potenza. In contrasto con questi, per esempio, vi sono i cuscinetti magnetici passivi i quali però producono forze solo attraverso lo sfruttamento di magneti permanenti, il cui comportamento però in accordo con il Teorema di Earnshaw, deve essere reso stabile mediante interazioni di forze di diversa natura (elettromagnetica, superconduttiva, meccanica, ecc...). Nella maggior parte delle applicazioni elettromeccaniche, il controllo della dinamica di processo rappresenta dunque un fattore chiave, motivo di forte espansione tecnologica degli AMB.

Nello schema di Figura 6.1 sono rappresentati i componenti base costituenti un sistema elettromagnetico per la levitazione magnetica.

---

<sup>15</sup> GUI: Graphical User Interface.

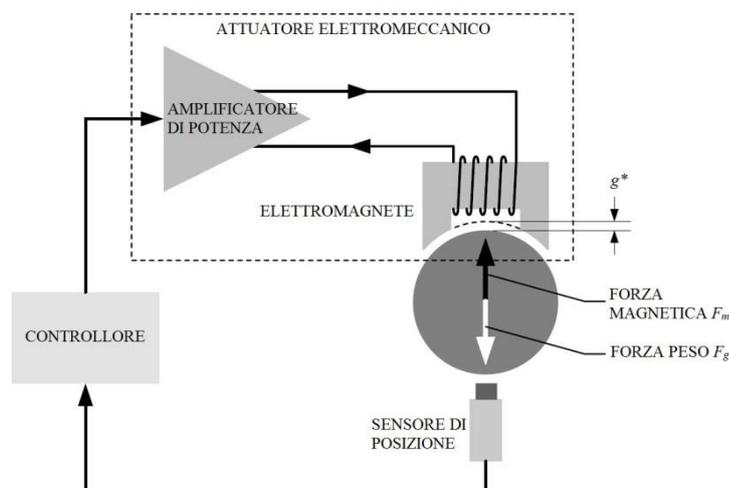


Figura 6.1 – Esempio della struttura di controllo base di un sistema AMB [18].

Un corpo flottante è sospeso liberamente in aria ad una certa distanza dall'elettromagnete  $g^*$ . Un sensore di posizione “free-contact” (es. sensore ottico di posizione) supervisiona la deviazione rispetto al riferimento impostato. Questo, trasmette la relativa informazione di posizione al controllore che, sulla base dell'errore, agisce secondo un algoritmo stabilito il quale fa circolare una certa corrente nella bobina, garantendo nel complesso la stabilità nell'intorno della posizione desiderata.

### 6.2.1 Linearizzazione del sistema

Il cuscinetto magnetico presenta una sostanziale differenza dall'esempio citato nel paragrafo precedente. La sospensione del volano avviene infatti ad opera dei magneti permanenti e non dal solo elettromagnete: la presenza delle due bobine è, appunto, direttamente legata al controllo di posizione.

Globalmente la dinamica del sistema di sospensione non è lineare a causa delle proprietà dei materiali utilizzati (acciaio dolce, magneti permanenti, ecc) ma, sotto determinate ipotesi, è possibile semplificare il problema [25-26]. Dunque si è pensato di linearizzarne il comportamento, in primo luogo per semplicità di implementazione ed in secondo luogo perché si ritiene che l'intervallo di oscillazione del volano sia prossimo al valore di riferimento imposto  $z^*$ . Come prima ipotesi si consideri a guadagno unitario e ritardo nullo la dinamica del sensore e dell'amplificatore di potenza.

L'equazione di equilibrio delle totali forze agenti nel sistema (forza positiva se ha verso coerente con l'asse  $z$  positivo):

$$F_{PM} + F_{cp} - F_{cn} - Mg + \Delta F = F_{tot} \quad (6.1)$$

Con:

- $F_{PM}(\vartheta, g)$  forza dei magneti permanenti [N] in funzione della temperatura  $\vartheta$  e del traferro  $g$ ;
- $F_{cp}(I_{cp}, g)$  forza elettromagnetica[N] funzione della corrente che circola nella bobina superiore  $I_{cp}$  e del traferro  $g$ ;
- $F_{cn}(I_{cn}, g)$  forza elettromagnetica [N] funzione della corrente che circola nella bobina inferiore  $I_{cn}$  e del traferro  $g$ ;
- $Mg$ , forza peso [N] del volano;

- $\Delta F$ , eventuale forza di disturbo [N];
- $F_{tot}$ , forza risultante dalla sommatoria delle forze agenti nel sistema [N].

Dalle caratteristiche di forza in funzione del traferro e della corrente è possibile ricavare, per piccole variazioni di traferro relativamente al valore di riferimento, le rispettive costanti  $k_g$  (fattore di forza/traferro [N/m]) e  $k_c$  (fattore di forza/corrente [N/A]):

$$F(z, i) = -k_g(z^* - z) + k_c i \quad (6.2)$$

La formula (6.2) rappresenta l'equazione fondamentale che descrive il funzionamento di un attuatore magnetico controllato in corrente. In altre parole definisce la forza di compensazione, funzione sia del traferro sia della corrente delle bobine. Benché la suddetta è solo un'approssimazione del comportamento reale del sistema, vale solo in prossimità del valore di riferimento del traferro. Qualora si considerassero anche i fenomeni non lineari (es. non linearità del circuito ferromagnetico) diventa necessaria una descrizione più accurata del modello.

L'obiettivo del controllo è quella di: mettere in gioco una forza di richiamo e fornire uno smorzamento delle oscillazioni nell'intorno del punto operativo (comportamento simile al caso del classico sistema molla-smorzatore).

Attualmente esistono molti tipi di sistemi di controllo, più o meno sofisticati, realizzati con diverse tecniche, come dispositivi informatici, idraulici e pneumatici. I più diffusi sono i controllori PID [27].

I PID sono regolatori standard tempo invarianti i quali utilizzano tre tipi di leggi di controllo diverse: azione proporzionale, azione integrale e azione derivativa (da qui l'acronimo PID). Benché utilizzino una tecnologia realizzativa antiquata per gli standard tecnologici attuali, questi controllori vengono ancora diffusamente utilizzati soprattutto per la relativa semplicità di taratura dei parametri di lavoro. È infatti ragionevole ritenere che il controllore PID, nelle sue innumerevoli varianti, gestisca attualmente circa il 95% degli anelli di regolazione presenti negli impianti.

La grande diffusione dei regolatori PID è legato a diversi fattori:

- notevole efficacia nella regolazione di un'ampia gamma di processi industriali;
- relativa semplicità di taratura;
- importanza e convenienza economica della standardizzazione (per l'utilizzo, la robustezza e l'affidabilità, il costo di progetto, produzione e manutenzione, ecc.);
- le prestazioni scadenti di molti sistemi di controllo sono dovute a problemi nei sensori e negli attuatori. Rumore e filtri anti-aliasing inadeguati, errori di calibrazione dei sensori, eccessivo filtraggio nei sensori "smart", cattivo dimensionamento, isteresi e attriti statici nelle valvole di regolazione sono le cause più citate. In presenza di problemi di tale natura, il ruolo della legge di controllo può diventare modesto, per cui viene meno la motivazione di cercare leggi di controllo più sofisticate di quelle PID;
- sfruttando la conoscenza di specifiche proprietà dinamiche del processo, possono portare notevolissimi miglioramenti delle prestazioni a fronte di costi e sforzi realizzativi relativamente modesti.

In sintesi, si può forse affermare che i PID hanno successo perché rappresentano una soluzione non facilmente superabile, in generale, nel rapporto efficacia/costo globale.

### 6.3 Definizione del problema

Si consideri nuovamente l'equazione (6.1) di equilibrio delle forze. Il bilancio ottimo, cioè a perdite ohmiche nulle, è raggiunto quando ( $F_{cp} = F_{cn} = \Delta F = 0$ ) la forza dei magneti permanenti eguaglia la forza peso della massa rotante:

$$F_{MP} - Mg = F_{tot} = 0 \quad (6.3)$$

La  $F_{tot}$  rappresenta la forza risultante complessiva agente nel sistema cuscinetto-volano, nell'ipotesi di invariabilità della massa  $M$  del volano:

$$F_{tot} = M\ddot{\Delta z} \quad (6.4)$$

Integrando l'accelerazione  $\ddot{\Delta z}$  con cui varia il sistema, si ottiene la variazione di velocità  $\dot{\Delta z}$  e, integrando ulteriormente, la variazione della posizione  $\Delta z$  rispetto quella del riferimento  $z^*$ . La dinamica del cuscinetto magnetico prosegue con il controllore PD il quale elabora l'errore  $\varepsilon z$  come differenza tra  $z^*$  e  $z$ , fornendo come uscita la corrente di controllo con la quale il sistema deve reagire. Questa sarà elaborata dal relativo blocchetto che incorpora i dati della dinamica della bobina e, nel passo successivo, da quello che ne definisce l'entità della forza derivata. In conclusione, si sommano le forze agenti nel sistema complessivo e si torna all'analisi della (6.4).

Nella pagina che segue è riportato l'intero modello implementato in Simulink (Figura 6.2).

Per chiarificazione è necessario definire brevemente la scelta dei riferimenti spaziali che utilizza il suddetto modello.

$$\begin{cases} z^* = z^*(\vartheta) + \Delta z^* \\ g^* = g^*(\vartheta) - \Delta z^* \end{cases} \quad (6.3)$$

Una siffatta formulazione è necessaria dal momento che i blocchetti che modellizzano le caratteristiche del sistema hanno come input riferimenti spaziali differenti. La variabile  $\Delta z^*$  definisce la variazione da apportare al riferimento teorico funzione della temperatura  $z^*(\vartheta)$  necessario per riposizionare il volano in una quota spaziale tale per cui si hanno correnti di controllo nulle. Quando si descriverà nel dettaglio i diversi blocchi che formano il modello, sarà spiegato in modo più preciso la scelta dell'adozione di un controllo primario (blocco 1, PD Control) e di uno secondario (blocco 2, Zero Current).

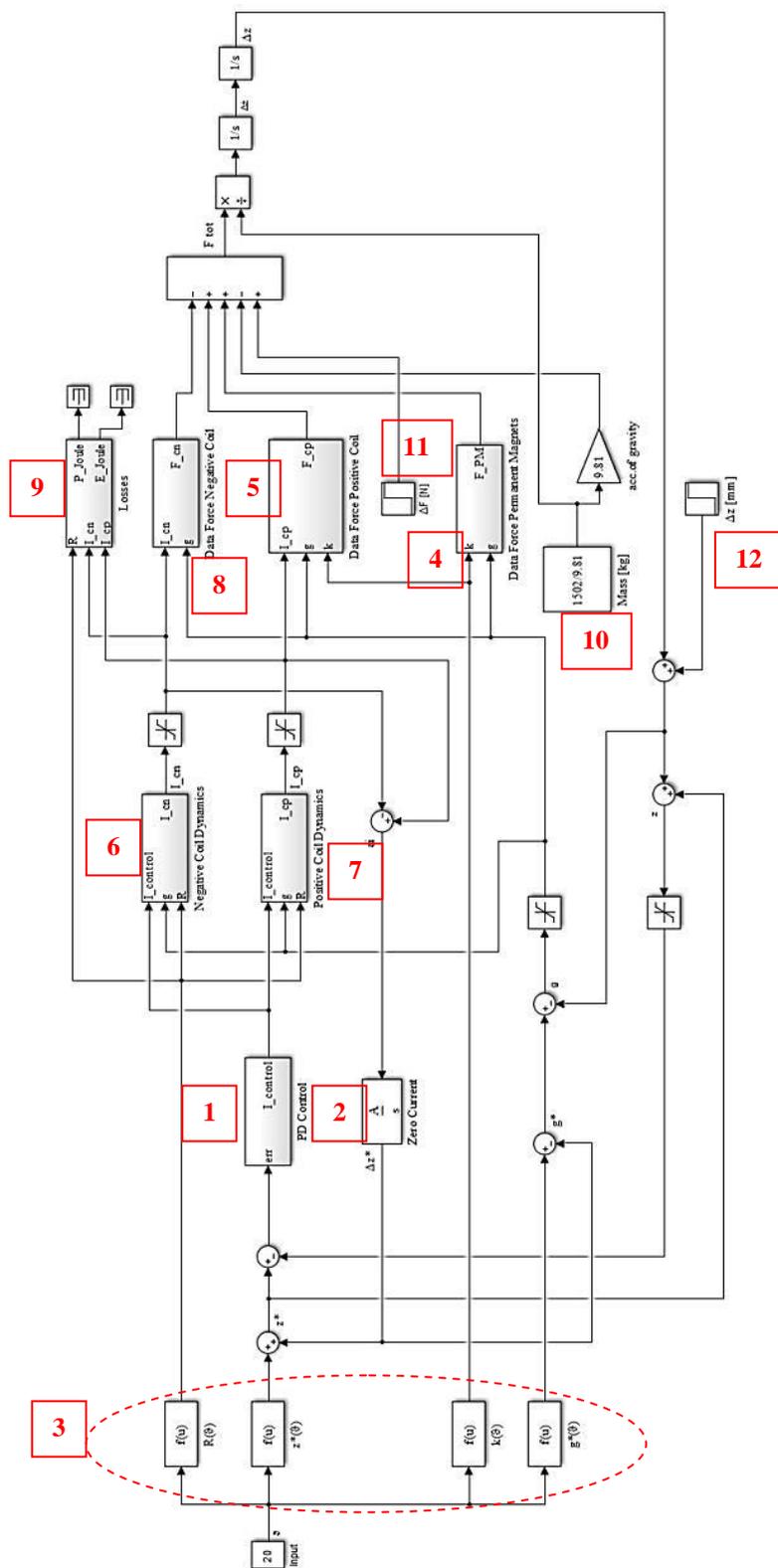


Figura 6.2 – Schema di controllo della dinamica del volano.

### 6.3.1 Parametri dipendenti della temperatura

L'input di ingresso del sistema è la temperatura ambiente di lavoro del volano. Indipendentemente dalla sua dinamica di evoluzione, il valore è preso come ingresso per altre funzioni (gruppo n.3) che dipendono direttamente da questa, come la resistenza delle bobine di controllo, i riferimenti di asse z e di traferro  $g$  da imporre al volano e, infine, il coefficiente  $k$  di prestazione dei magneti.

Per quanto concerne il valore di resistenza, entrambe le bobine sono di rame e la loro dipendenza dalla temperatura è lineare e ben nota dalla relazione seguente:

$$R = \rho_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \frac{L}{S} \quad (6.4)$$

Per l'intervallo di temperatura esaminato è stato parametrizzato l'andamento di  $R$ , espresso in ohm:

$$R(\vartheta) = m_1 \vartheta + q_1 \quad (6.5)$$

Tabella 6.1 – Parametri delle equazioni (6.4) e (6.5).

$\rho_0$ [ $\Omega m$ ]	$1.69 * 10^{-8}$
$\alpha$ [ $1/^\circ C$ ]	0.00393
$S$ [ $m^2$ ]	$2 * 10^{-4}$
$L = 2\pi r r_m$ [ $m$ ]	1.54
$m_1$ [ $1/^\circ C$ ]	$5 * 10^{-7}$
$q_1$ [ $\Omega$ ]	0.0001

Anche la parametrizzazione delle due coordinate spaziali assume carattere lineare aventi comportamento duale rispetto la situazione ottimale di funzionamento alle massime prestazioni dei magneti permanenti.

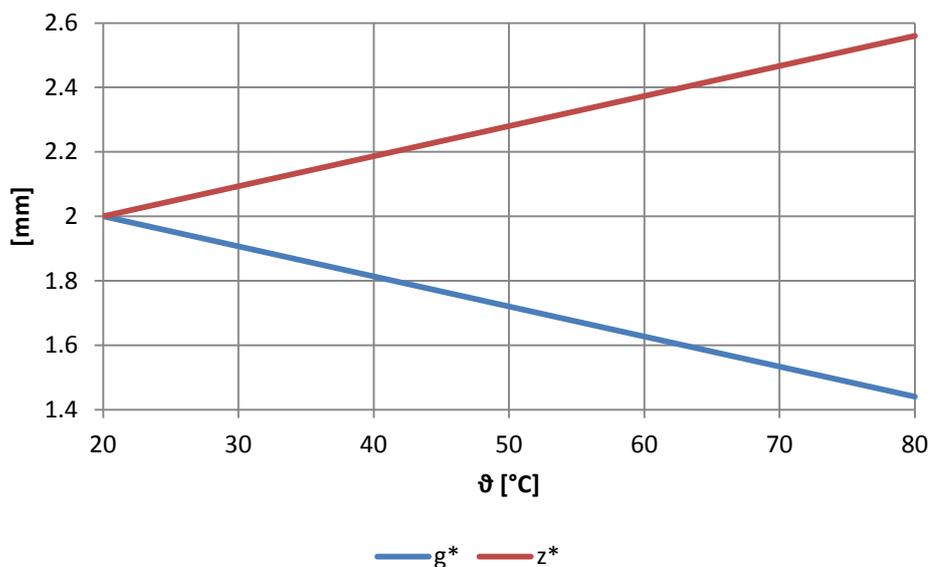


Figura 6.3 – Andamenti dei riferimenti spaziali in funzione della temperatura.

La loro dipendenza dalla temperatura è lineare e sono così formalizzate (esprese in mm):

$$z^*(\vartheta) = m_2\vartheta + q_2 \quad (6.6)$$

$$g^*(\vartheta) = m_3\vartheta + q_3 \quad (6.7)$$

Tabella 6.2 – Parametri delle equazioni (6.6) e (6.7).

$m_2$ [1/°C]	0.0093
$q_2$ [mm]	1.8133
$m_3$ [1/°C]	-0.0093
$q_3$ [mm]	2.1867

Il coefficiente  $k$ , invece, da un'indicazione in merito alle prestazioni dei magneti. È un parametro che caratterizza il loro comportamento intrinsecamente dipendente dalle variazioni di temperatura.

Considerando una formulazione analitica generalizzata, vale la seguente relazione:

$$f(k) = f_0 + k\Delta f \quad (6.8)$$

La relazione 6.8 mostra come in questo caso, una generica funzione  $f$  dipendete dal parametro  $k$ , può essere espressa come somma di una funzione media di riferimento  $f_0$  e di un termine differenziale  $\Delta f$  che moltiplica  $k$ . Tale relazione sarà applicata alla formulazione analitica del comportamento dei sottosistemi 4 e 5, descritti nei paragrafi che seguono.

$$k(\vartheta) = m_4\vartheta + q_4 \quad (6.9)$$

Tabella 6.3 – Parametri equazione (6.9).

$m_4$ [1/°C]	-1/30
$q_4$	5/3

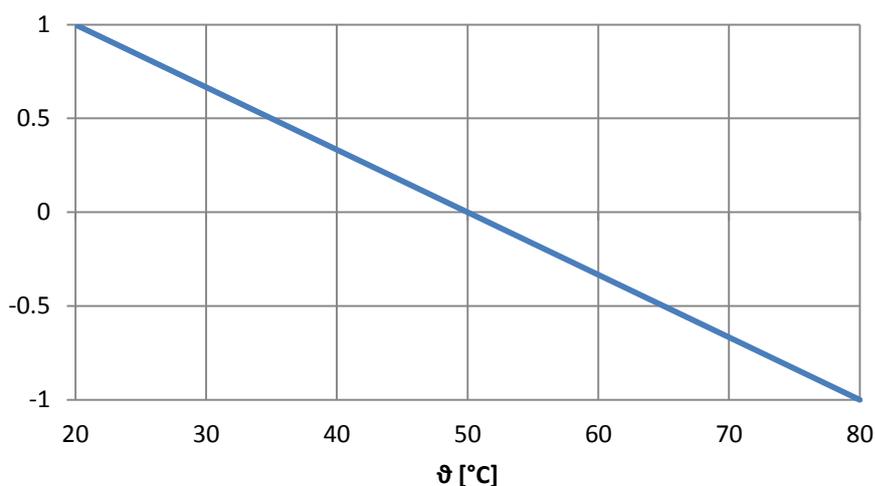


Figura 6.4 – Andamento del coefficiente  $k$  in funzione della temperatura.

### 6.3.2 Dettaglio sottosistema “Data Force Permanent Magnets”

In questo paragrafo è riportata brevemente lo schema dell’organizzazione dei dati per la modellizzazione della forza dei magneti permanenti agenti nel volano. Tale forza dipende sia dal traferro  $g$  sia dalla temperatura  $\vartheta$ . Ora, per formulare in modo semplice questa duplice dipendenza, si è espresso in maniera intrinseca la dipendenza dalla temperatura. Prese infatti le caratteristiche di forza in funzione del traferro nei due estremi di temperatura  $F_{PM}(20^{\circ}C)$  e  $F_{PM}(80^{\circ}C)$ , si è calcolata la forza media  $F_{PM,0}$  tra le due. Essendo inoltre, per ogni valore di traferro, costante lo scarto (in valore assoluto) tra il valore medio di forza e quello alla temperatura nei due estremi  $\Delta F_{PM}$ , è possibile descrivere la dipendenza dalla temperatura in modo indiretto sulla base di un coefficiente  $k(\vartheta)$ . L’espressione finale è del tipo:

$$F_{PM}(g, k) = F_{PM,0}(g) + k\Delta F_{PM}(g) \quad (6.10)$$

Lo schema dettagliato del blocco 4 è riportato in Figura 6.5.

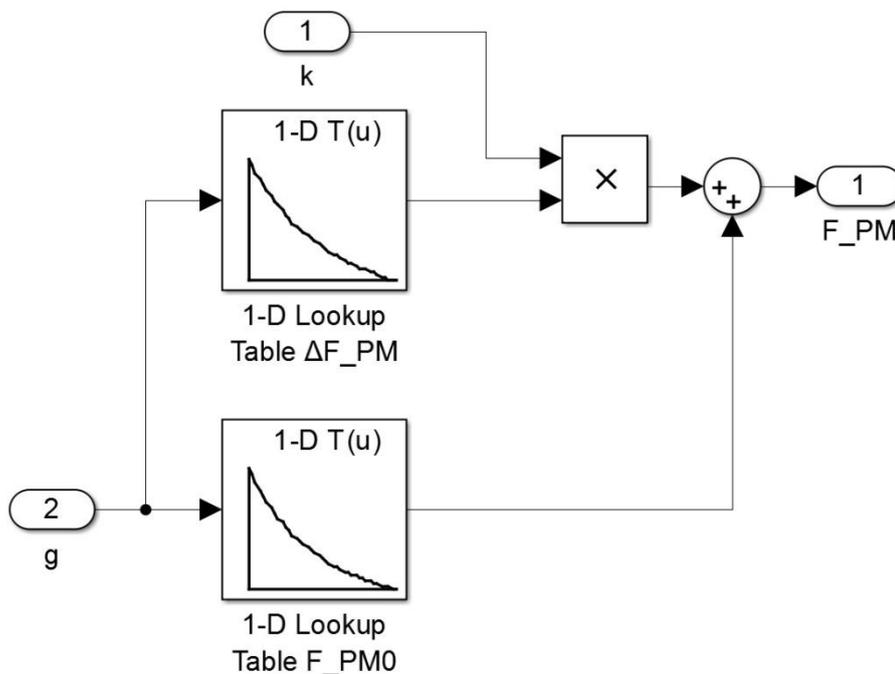


Figura 6.5 – Schema a blocchi del sottosistema 4.

La duplice dipendenza dell’andamento della forza espressa dai magneti permanenti è mostrato in Figura 6.6.

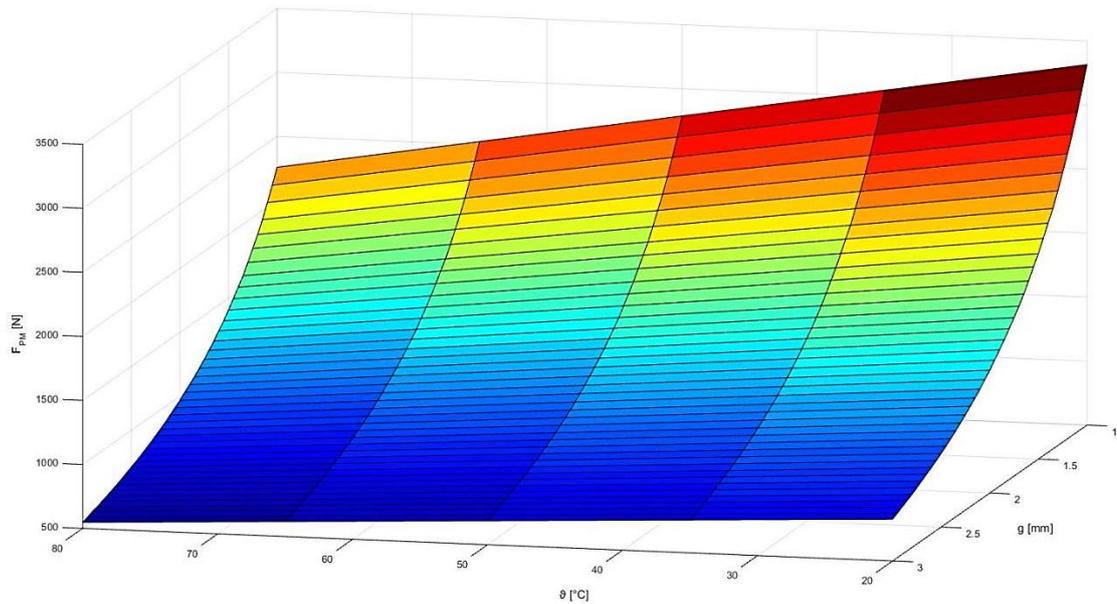


Figura 6.6 – Diagramma 3D della forza esplicita dai magneti permanenti in funzione del traferro.

### 6.3.3 Dettaglio sottosistema “Negative Coil Dynamics” e “Positive Coil Dynamics”

Come già visto, il modello nel complesso è organizzato gerarchicamente in più livelli: quello principale è quello visibile in Figura 6.2 mentre i blocchetti di colore grigio rappresentano dei sottolivelli o sottosistemi. I sottosistemi 6 e 7 contengono a loro volta dei blocchetti che ne descrivono più in particolare la dinamica di corrente, in retroazione, delle bobine di controllo.

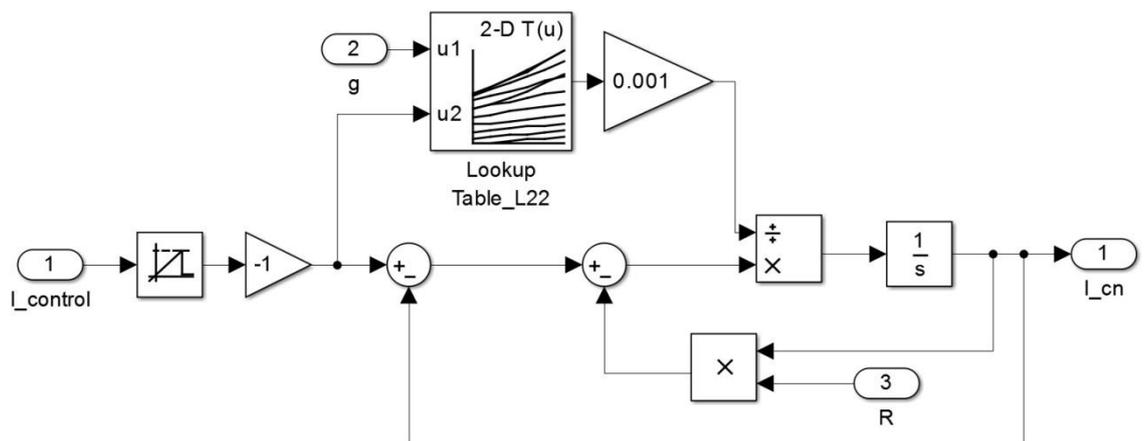


Figura 6.7 – Schema a blocchi sottosistema 6.

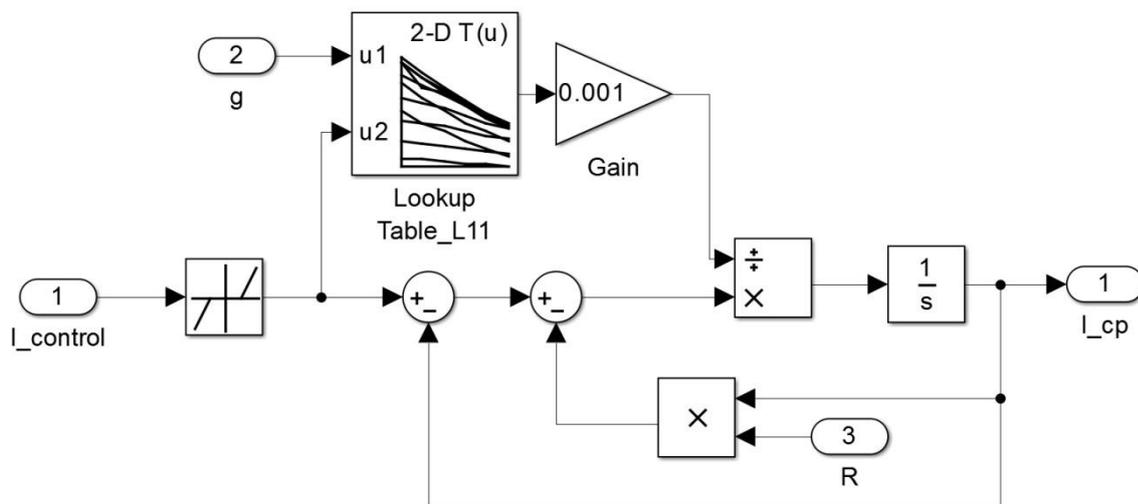


Figura 6.8 – Schema a blocchi sottosistema 7.

Fondamentalmente, gli ingressi da fornire sono tre: corrente  $I_{control}$ , resistenza  $R$  e traferro  $g$ . Il primo input deriva dal controllore principale sito a monte del sistema nel quale è elaborato il valore di corrente necessario all'aggiustamento della posizione del volano. In particolare, il sottosistema 6, elabora l'ingresso di corrente solo se è negativa. Il segno è solo un indice di selezione di quale tra le due bobine di controllo deve agire. Infatti, se  $I_{control} < 0$ , questa entra in 6 e viene subito cambiata di segno (guadagno unitario negativo in ingresso, in Figura 6.7) in quanto i dati elaborati in Maxwell fanno riferimento a valori positivi di corrente ma soprattutto perché, essendo le due bobine indipendenti, non ha senso definire una o l'altra corrente positiva o negativa. Inoltre, a seconda del valore di corrente e di traferro, le tabelle Lookup Table forniscono il corrispondente valore di induttanza del sistema. Stesso principio vale per il sottosistema 7 di Figura 6.8 se  $I_{control} > 0$ .

Per ciascun sottosistema, l'uscita è unica ed è data dal valore effettivo di corrente che la bobina deve erogare a fronte dell'errore elaborato. Dalla Figura 6.2 si nota inoltre la presenza di un blocco limitatore in uscita da 6 e 7 per limitare la corrente calcolata dal modello ai valori computati in Maxwell (corrente massima utilizzata di 2000 A).

Infine, in Figura 6.9 e 6.10 sono riportati i grafici tridimensionali degli andamenti delle induttanze delle due bobine in funzione dei due input da cui dipende.

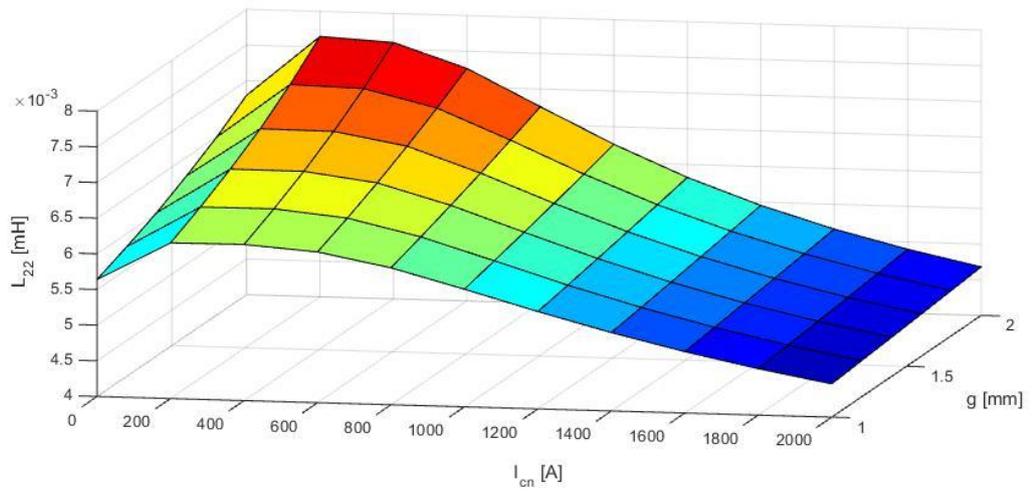


Figura 6.9 – Diagramma 3D del blocchetto “Lookup Table\_L22”.

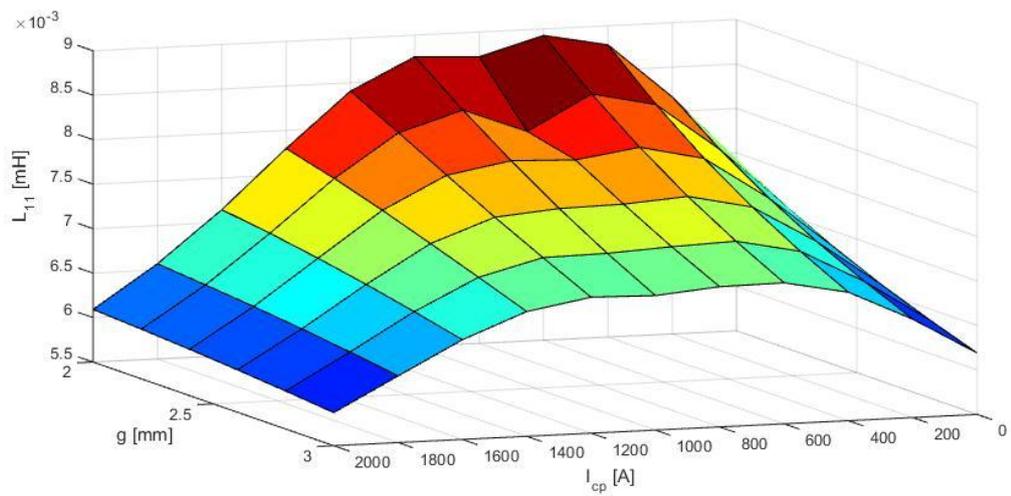


Figura 6.10 – Diagramma 3D del blocchetto “Lookup Table\_L11”.

La curiosa presenza di ondulazioni presenti nel diagramma di Figura 6.10 è dovuta probabilmente ad errori legati alla stima di convergenza della soluzione della simulazione in Maxwell.

### 6.3.4 Dettaglio sottosistema “Data Force Negative Coil” e “Data Force Positive Coil”

Complessivamente i seguenti sottolivelli raggruppano i dati derivati dagli studi parametrici delle simulazioni FEM, raggruppati in blocchetti del tipo Lookup Table. Il sottosistema 8, riportato in Figura 6.11, ingloba i dati che interessano la forza esplicita dalla bobina di controllo inferiore. Il motivo per cui ci sono due tabelle è legato alla dimensione massima degli ingressi accettati dal blocchetto. Pertanto, considerato l'intervallo di corrente esaminato (da zero a duemila, con passi di cento Ampere), i dati sono stati divisi in due Lookup Table contenente ciascuna 10 valori di corrente. Lo “Switch” attiva il blocco superiore se  $0 \leq I_{cn} \leq 1000$  A, altrimenti attiva quella inferiore.

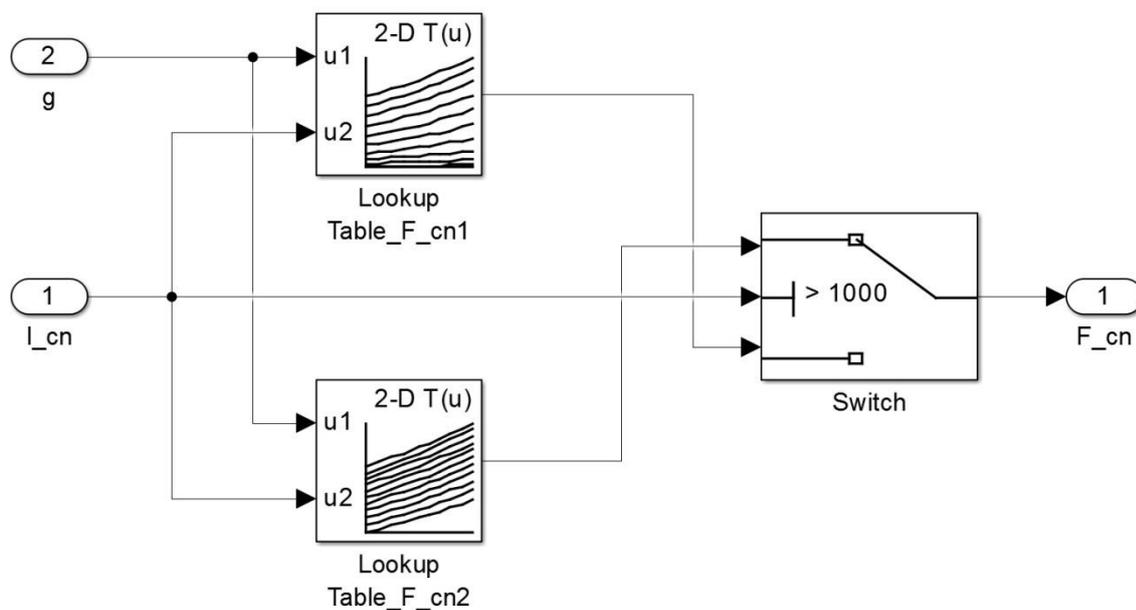


Figura 6.11 – Schema a blocchi sottosistema 8.

Il sottosistema 5, invece, appare leggermente più complesso. Anche qui, in riferimento alla Figura 6.12, la suddivisione in due parti del blocco 5 è legata alle dimensioni accettate in ingresso dalle Lookup Table, come spiegato nella parte iniziale del paragrafo.

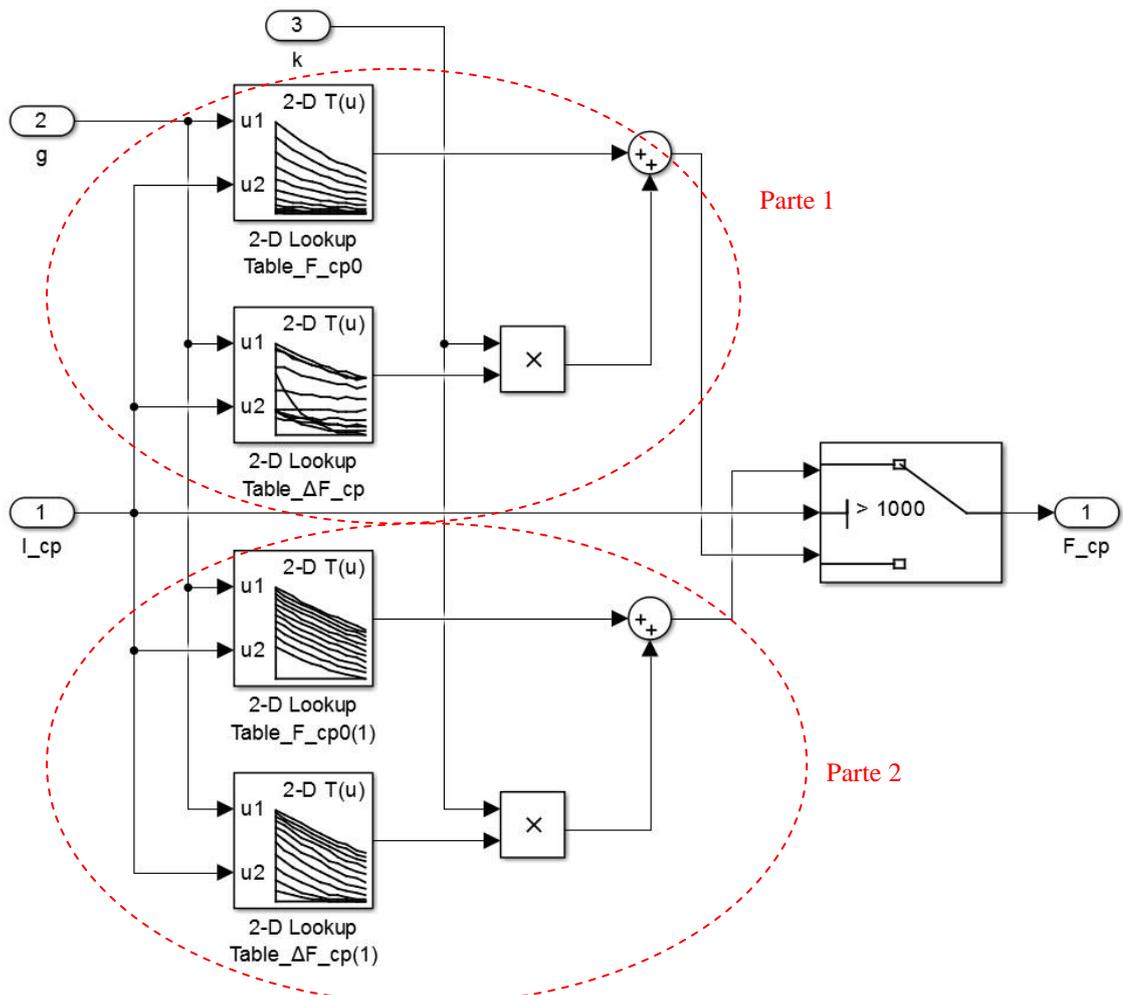


Figura 6.12 – Schema a blocchi sottosistema 5.

Ciascuna di queste due parti del sottosistema è stata trattata come spiegato precedentemente nel paragrafo 6.3.2, ovvero la forza esplicita dalla bobina superiore è formalizzata con un'equazione intrinsecamente dipendente dalla temperatura di lavoro. Infatti, il circuito ferromagnetico della bobina superiore, essendo essa compresa tra i due magneti del cuscinetto magnetico, è soggetto all'interazione con le linee di campo prodotte dai magneti stessi, dunque anche la sua dinamica dipende dal coefficiente di prestazione  $k(\vartheta)$ . In modo del tutto simile all'equazione (6.9), la formulazione analitica della forza espressa dalla bobina superiore vale:

$$F_{cp}(I_{cp}, g, k) = F_{cp,0}(I_{cp}, g) + k\Delta F_{PM}(I_{cp}, g) \quad (6.11)$$

Ovviamente, nel calcolo delle forze si tiene conto della presenza dei magneti e il valore della forza  $F_{cp,0}$  e degli scarti  $\Delta F_{PM}$  espressi in 6.11 sono ricavati per differenza tra la forza di levitazione risultante e la componente dovuta ai singoli magneti.

Gli andamenti di variazione della forza in relazione ai due ingressi, sono visualizzabili nei diagrammi tridimensionali di Figura 6.13 e 6.14.

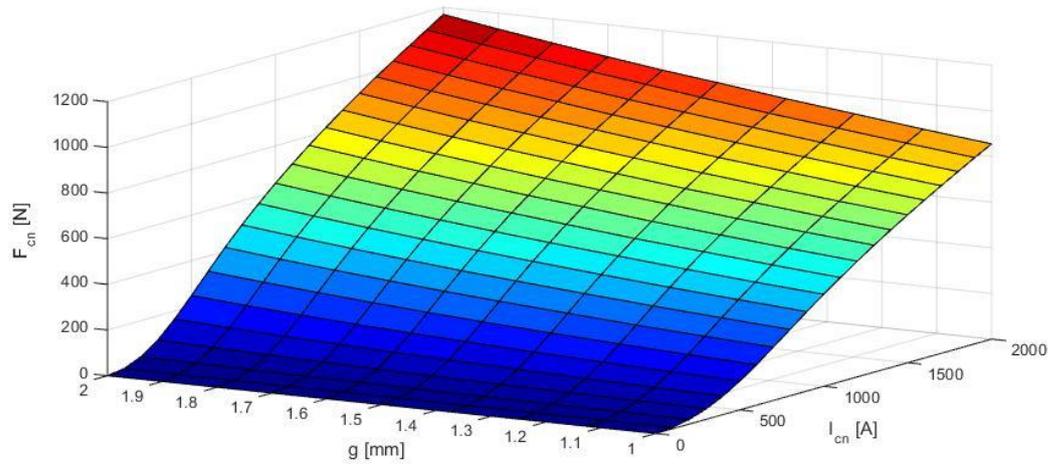


Figura 6.13 – Diagramma 3D della forza esplicita dalla bobina inferiore in funzione del traferro e della corrente che l'attraversa.

Da notare l'offset di forza  $F_{cp}$  presente a corrente nulla (Figura 6.14) in spiegazione del fatto che anche nella situazione di regime ( $I_{cp} = I_{cn} = 0$ ) parte delle linee del flusso magnetico si richiudono attraverso il circuito ferromagnetico della bobina di controllo.

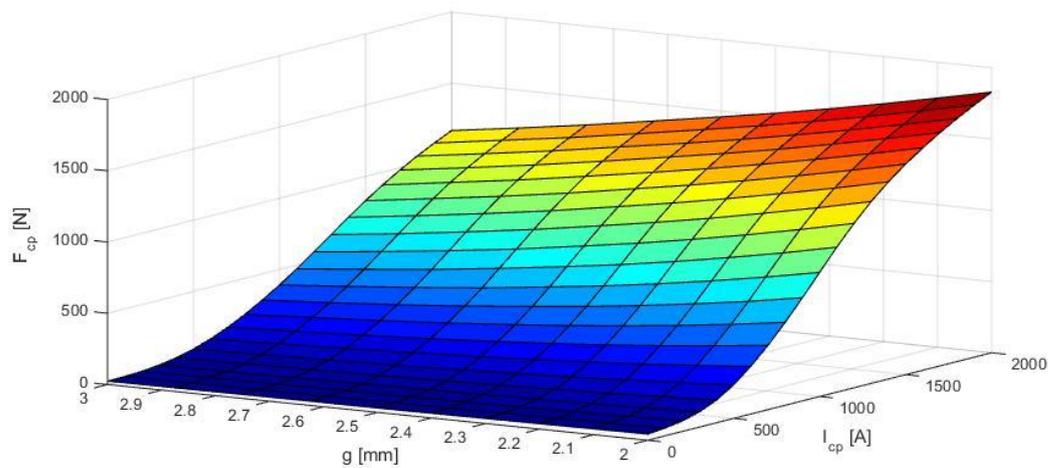


Figura 6.14 – Diagramma 3D della forza esplicita dalla bobina superiore in funzione del traferro e della corrente che l'attraversa.

### 6.3.5 Dettaglio sottosistema “Losses”

Il sottosistema 9 qui illustrato, calcola semplicemente le perdite totali per effetto Joule derivato dalla conduzione di corrente nelle due bobine, secondo le relazioni:

$$P_{Joule} = RI_{cn}^2 + RI_{cp}^2 \quad (6.12)$$

$$E_{Joule} = \int P_{Joule} dt \quad (6.13)$$

L'integrazione temporale fatta dal Simulink copre l'intero intervallo di simulazione.

Il parametro  $P_{Joule}$  è espresso in [W], mentre il coefficiente moltiplicativo  $\frac{1}{3600}$  consente l'interpretazione della totale energia dissipata in [kWh].

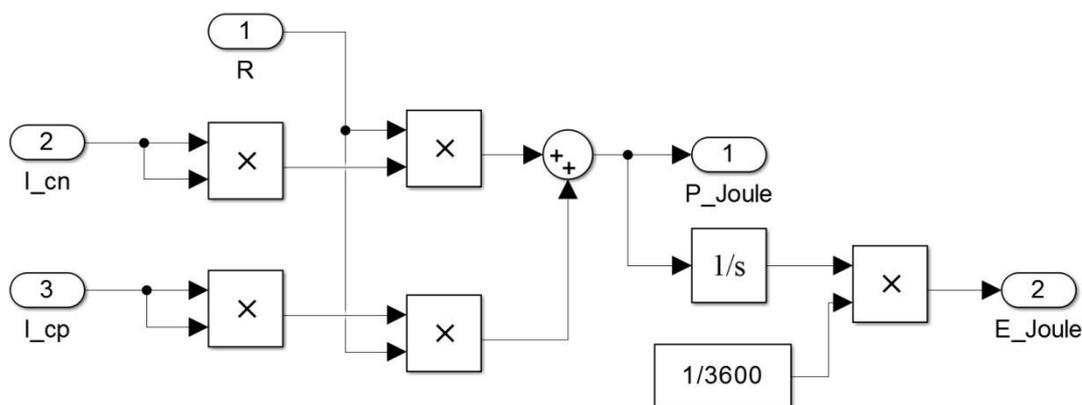


Figura 6.15 – Sottosistema per il calcolo delle perdite per effetto Joule.

### 6.4 Controllore PID

In questo paragrafo si vogliono fornire alcune informazioni utili al fine di comprendere il significato, le conseguenze e le limitazioni delle diverse leggi di controllo.

Il significato dell'azione proporzionale sta nel fatto che maggiore è l'errore all'ingresso del controllore e maggiore sarà l'azione di controllo svolta dallo stesso. Esso provoca l'attuazione di una correzione proporzionale all'errore in funzione del guadagno  $P$  aumentando la velocità di risposta del sistema e, se il guadagno è troppo elevato, diminuisce la stabilità con conseguente aumento delle oscillazioni dei parametri esaminati.

Il contributo dell'azione integrale, invece, è proporzionale all'integrale dell'errore in ingresso (e quindi proporzionale al suo valor medio). L'azione integrale è particolarmente importante nelle applicazioni, perché assicura un errore nullo a regime. Un piccolo errore positivo condurrà sempre ad un incremento del segnale di controllo, e un errore negativo darà un decremento del segnale di controllo a prescindere dal fatto di quanto sia piccolo l'errore. Esso rimane nullo anche in presenza di variazioni del guadagno del processo, purché sia preservata la stabilità del sistema in catena chiusa. In generale l'azione integrale è associata all'azione proporzionale (controllori PI) e sono utilizzati quando è richiesto un errore a regime di modesta entità unito ad una buona velocità di risposta alle variazioni della sollecitazione. Spesso sono inseriti soprattutto nei sistemi in cui le variazioni di carico

avvengono lentamente (non è il nostro caso). Il termine integrale però, a differenza di quello proporzionale, introduce uno sfasamento di  $90^\circ$  in ritardo (aggiunge un polo in termini di trasformata di Laplace) che porta ad un peggioramento dei margini di stabilità del sistema ad anello chiuso, limitando il valore del guadagno integrale.

Come ultima vi è l'azione derivativa la quale fornisce in uscita la derivata rispetto al tempo dell'errore. Un controllore derivativo viene chiamato anche controllore di velocità, oppure anticipatore. Il suo comportamento è diverso da quello dei controllori proporzionale e integrale. L'uscita di un derivativo non dipende dall'errore presente o passato, ma dalla velocità con cui varia l'errore: l'azione è complementare a quella integrale perché fornisce un anticipo di fase di  $90^\circ$ . L'effetto prodotto è quindi un aumento della velocità di inseguimento del riferimento. Purtroppo però, tale azione tende ad amplificare i segnali con contenuto armonico a frequenze elevate. Generalmente questi tipi di segnali corrispondono al rumore elettromagnetico sovrapposto al segnale utile, l'incremento del termine derivativo deve essere utilizzato con cautela. Nella realizzazione pratica dei regolatori infatti si adotta l'accorgimento di limitare l'azione derivativa in modo tale che in corrispondenza a transizioni a gradino l'uscita del blocco derivatore non abbia andamento impulsivo. La presenza di un rumore sui segnali di misura ne richiederebbe l'associazione con un filtro "passa basso" che ne limiti il guadagno ad alta frequenza.

## **6.5 Analisi di funzionamento del sistema**

Prima di passare all'analisi del funzionamento del sistema è necessario fare una precisazione: nei dati iniziali del progetto si dichiarava che la massa del volano è di circa 150 kg mentre nella modellizzazione FEM in Maxwell si è impostato il target dell'equilibrio di forze elettrodinamiche al valore di 1500 N; per coerenza, nel modello Simulink la massa del volano è fornita come rapporto costante tra la somma della forza esplicata dai magneti e dalla bobina superiore (a  $20^\circ\text{C}$ ) e l'accelerazione di gravità (vedi blocco 10 di Figura 6.2).

Nei paragrafi che seguono sono descritti nel dettaglio i vari aspetti del sistema complessivo di aggiustamento del traferro implementato nel modello, legate principalmente alle azioni di controllo adottate, associate anche allo studio di alcune casistiche che possono coinvolgere la dinamica del modello stesso. Come primo caso è analizzato il sistema di controllo primario "PD Control" (blocco 1) necessario allo smorzamento delle possibili variazioni della posizione del volano, e un sistema di controllo secondario "Zero Current" (blocco 2) atto ad annullare le correnti di controllo delle bobine aggiustando il riferimento di posizione imposto. Infine sono state studiate delle situazioni in cui la dinamica della posizione del traferro è perturbata a causa di diversi fattori, come la variazione di massa (blocco 11), di traferro (blocco 12) e di temperatura (variazione dell'input).

### **6.5.1 Sistemi di controllo**

Nel nostro caso di sospensione magnetica del volano, in linea di principio e nell'ipotesi di linearizzazione del sistema, il controllore da utilizzare è di tipo proporzionale-derivativo [28]. Per una migliore comprensione del proseguimento del capitolo, è opportuno anticipare la parametrizzazione dei valori del controllore derivata da un metodo iterativo qui non riportato.

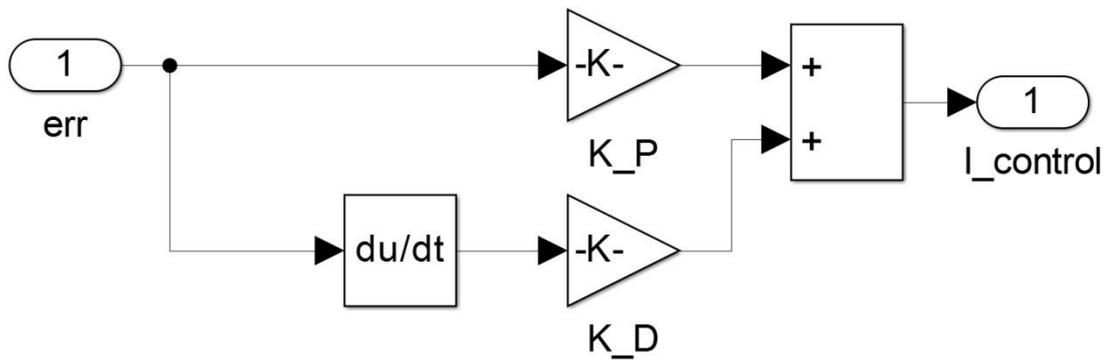


Figura 6.16 – Sottosistema 1.

La formula di compensazione del controllore primario è così espressa:

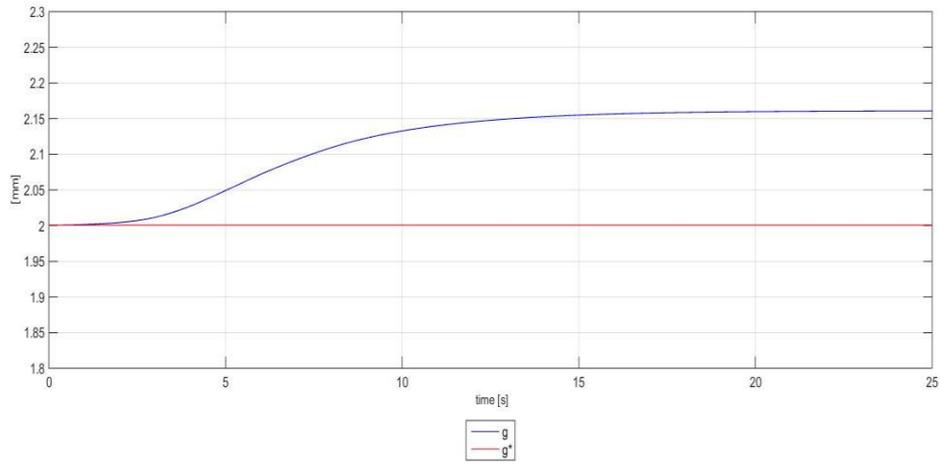
$$C_{PD}(s) = K_P + sK_D \quad (6.14)$$

Tabella 6.4 – Parametri schemi a blocchi 1 e 2.

$K_P$	3000
$K_D$	5000
$A$	0.00033

Ipotizzando  $A=0$ , l'evoluzione libera con solo controllore primario attivo porta a regime il sistema con valore costante dell'errore di traferro con conseguente stabilizzazione in un valore che non è quello imposto. In Figura 6.17 e 6.18 sono riportati rispettivamente gli andamenti dei parametri di traferro e le correnti, nel funzionamento a 20°C e a 80°C. Sulla base del rapporto tra l'errore di traferro a regime e la corrente erogata dalla bobina coinvolta nel controllo, è stato valutato il parametro  $A$  del blocco 2 di controllo, il cui valore è stato anticipato in Tabella 6.4.

a)



b)

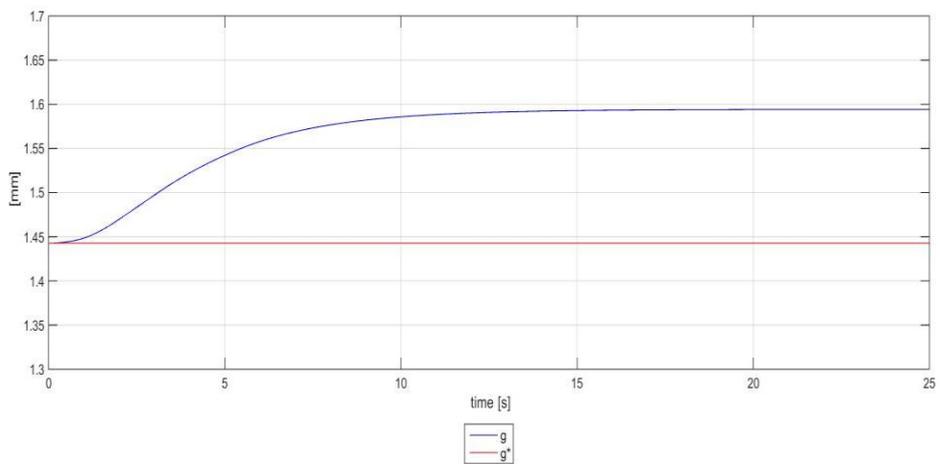


Figura 6.17 – Andamento temporale dei parametri di traferro: a)  $\vartheta = 20\text{ °C}$ ; b)  $\vartheta = 80\text{ °C}$ .

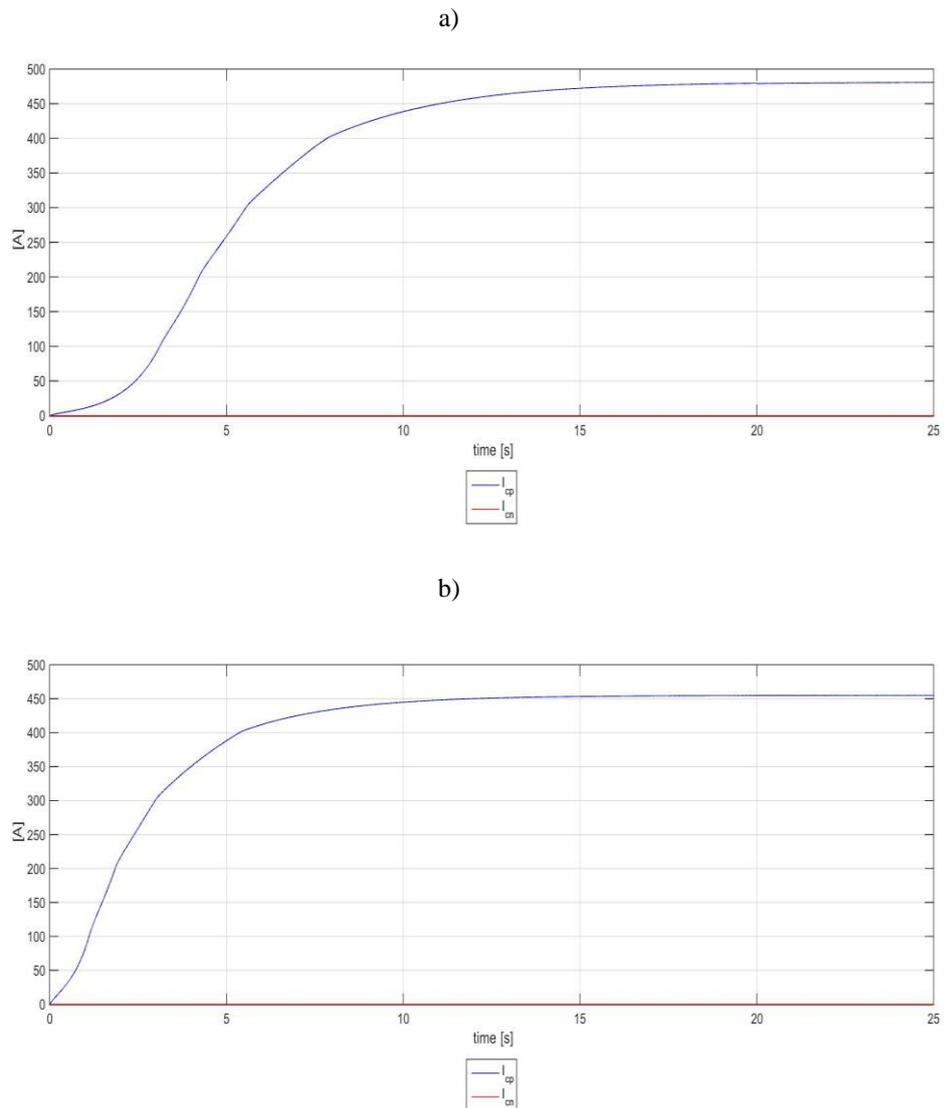


Figura 6.18 – Andamento temporale dei parametri di traferro: a)  $\vartheta = 20^\circ\text{C}$ ; b)  $\vartheta = 80^\circ\text{C}$ .

È stato verificato che un controllore di tipo PD non consente la stabilizzazione nel riferimento di posizione imposto ed è quindi necessario aggiungere un piccolo contributo di azione integratrice. Tale azione, se inserita all'interno del blocco 1, porta ad un'oscillazione costante dell'errore di traferro (e dualmente della coordinata spaziale  $z$ ). A tale scopo, l'azione integratrice è fornita dal controllo secondario "Zero Current" il cui parametro A definisce la variazione del riferimento di posizione per ogni Ampere di corrente di controllo. Il segno della variazione, dipende dalla bobina in uso. Ciò significa che se la differenza è positiva allora è necessario che il volano si avvicini di più ai magneti, viceversa se è negativa significa che i magneti agiscono sul volano con eccessiva forza attrattiva e dunque va allontanato (portato a valore di  $z^*$  inferiore).

## 6.5.2 Evoluzione libera

Nell'analisi dinamica del modello in evoluzione libera, la temperatura di input in ingresso è di valore costante di 20°C, blocchi 11 e 12 inattivi.

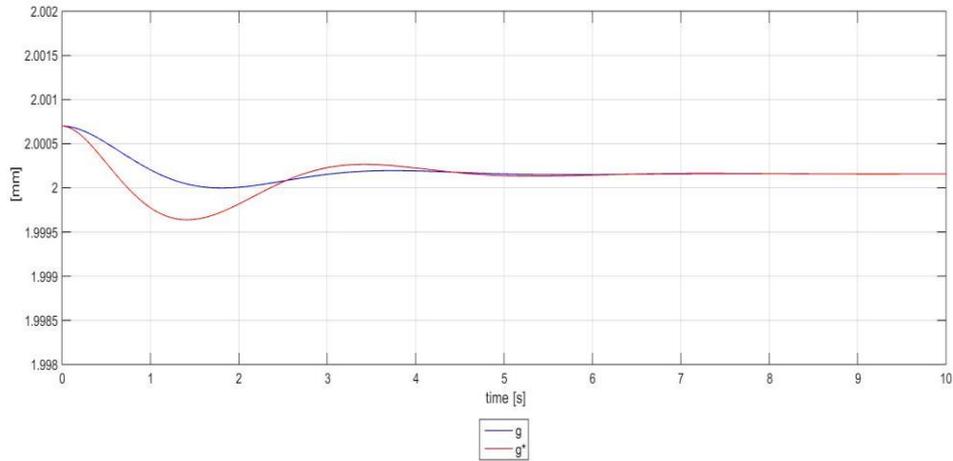


Figura 6.19 – Andamento temporale dei parametri di traferro.

Il volano è dunque sospeso liberamente in aria la cui dinamica di traferro risulta praticamente stabile sin dall'inizio del test, visti gli aggiustamenti dei parametri dell'ordine del millesimo di millimetro. L'azione secondaria del blocco 2 consente dunque la variazione del riferimento da imporre al sistema, sommato a quello imposto dalla temperatura di input, al fine di annullare a regime l'errore calcolato.

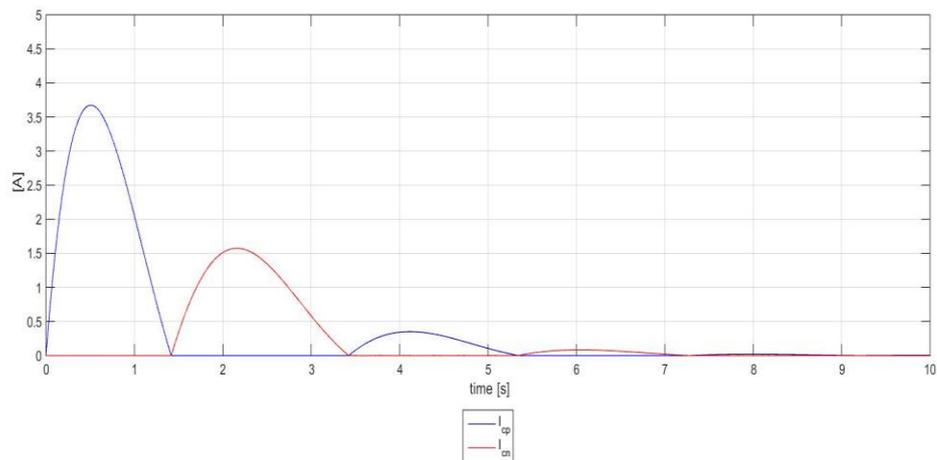


Figura 6.20 – Andamento temporale delle correnti di controllo.

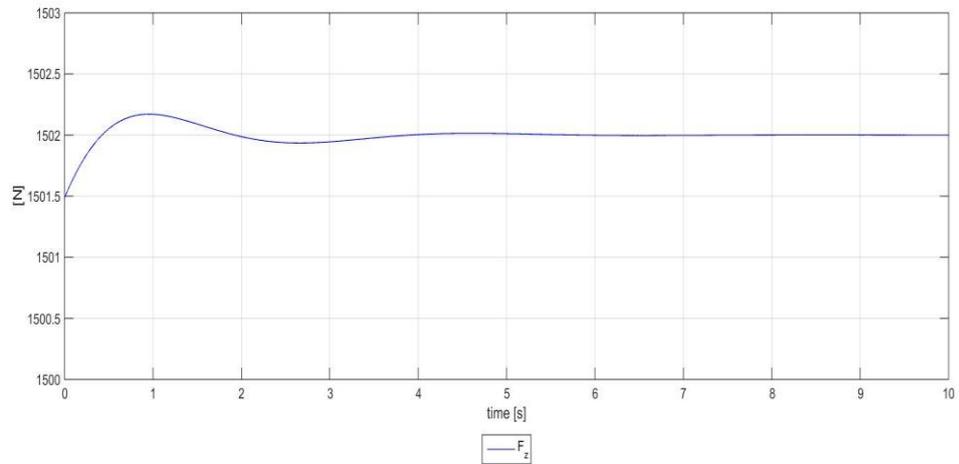


Figura 6.21 – Andamento temporale della forza totale di levitazione.

Il grafico di Figura 6.21 mostra l'andamento della forza totale di sospensione calcolata come somma algebrica dei tre termini di forza agenti:

$$F_z = F_{PM} + F_{cp} - F_{cn} \quad (6.15)$$

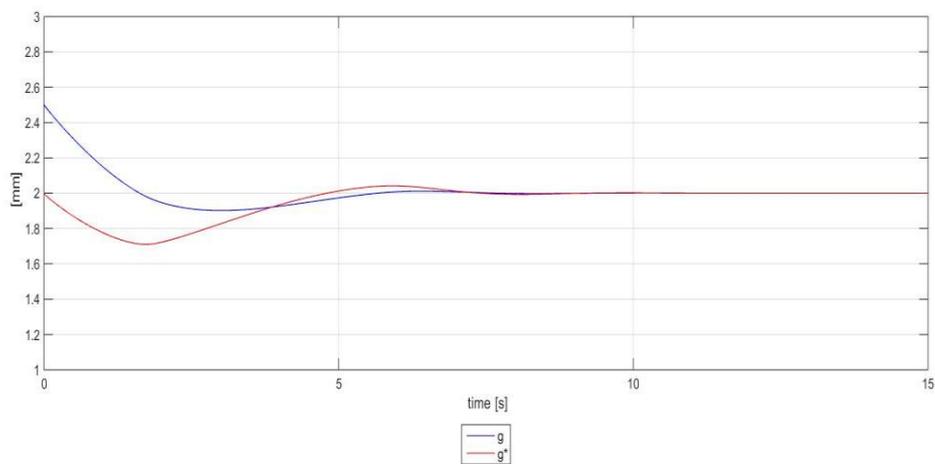
Il valore raggiunto a regime eguaglia la forza peso del volano.

### 6.5.3 Disturbo $\Delta z$ non nullo

Lo scopo di questo paragrafo e di quelli che seguono è quello di definire ed analizzare alcuni scenari "realistici" che possono influenzarne la dinamica del modello.

In questo primo caso, posta la temperatura a valore costante di 20°C, si ipotizza che il posizionamento iniziale del volano venga spostato rispetto la posizione del riferimento (blocco 11 inattivo). In particolare, è stata studiato il duplice caso di spostamento, rispettivamente di  $\Delta z = -0.3$  mm e di  $\Delta z = 0.3$  mm, mediante l'utilizzo del blocco 12.

a)



b)

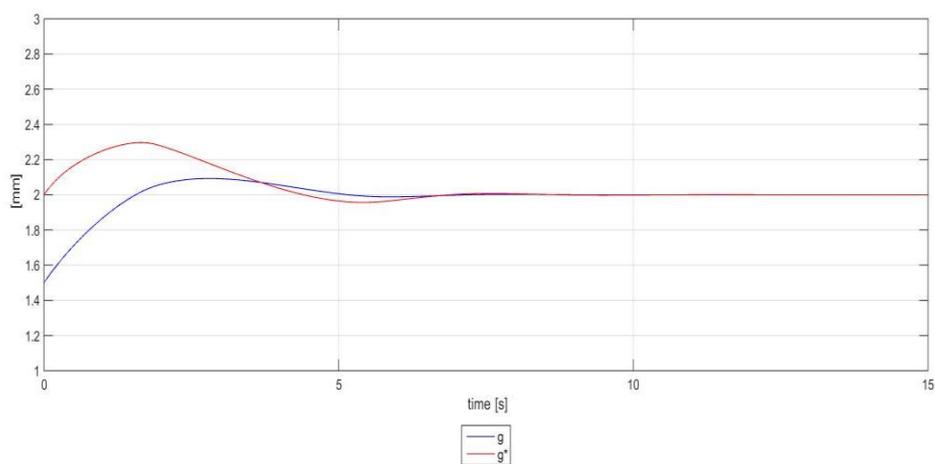


Figura 6.22 – Andamento temporale dei parametri di traferro con: a)  $\Delta z = -0.3$  mm;  
b)  $\Delta z = 0.3$  mm.

Da quanto visibile in Figura 6.22, gli andamenti sono simmetrici rispetto il valore di riferimento raggiunto a regime. Per entrambi, si nota come l'effetto dei due controllori, operi una sorta di "inseguimento predittivo" del proprio riferimento.

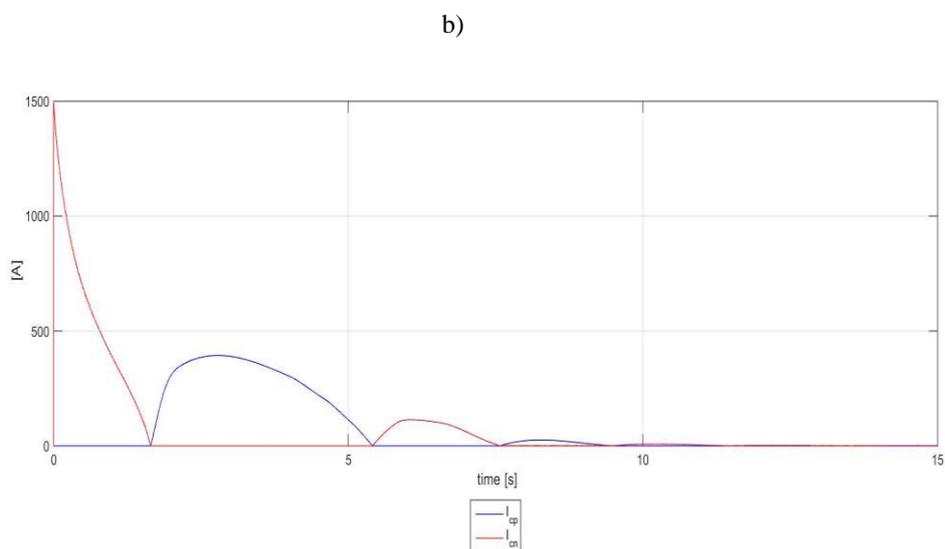
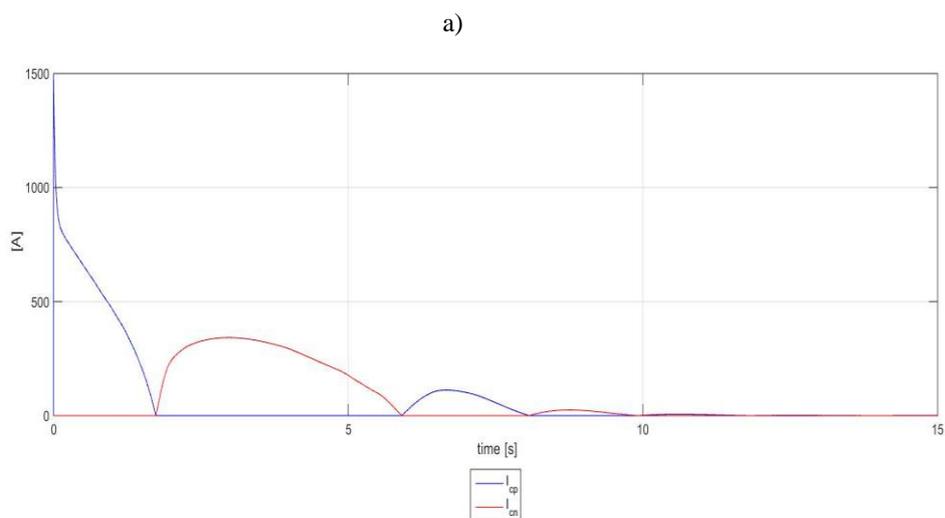


Figura 6.23 – Andamento temporale delle correnti di controllo con: a)  $\Delta z = -0.3$  mm;  
b)  $\Delta z = 0.3$  mm.

Anche in questo caso, in Figura 6.23 è mostrato l'andamento delle correnti di controllo la cui dinamica è del tutto simmetrica nei due casi a) e b). Dati i valori relativamente bassi delle induttanze delle bobine, il sistema è fin da subito dinamicamente molto pronto portandosi a regime a correnti nulle in poco meno di 10 s.

#### 6.5.4 Variazione di massa del volano

Si consideri ora l'ipotesi iniziale di ingresso di temperatura costante di 20°C e blocco 12 inattivo. Dati i risultati delle analisi parametriche condotte in Maxwell, la massa del volano è fatta corrispondere esattamente al rapporto 1502/9.81 [kg].

Qualora l'effettivo valore di massa non corrispondesse a quello calcolato, il sistema di controllo deve fare in modo di portare la massa sospesa ad un valore di traferro tale per cui siano sempre e solo i

magneti permanenti a lavorare. Ovviamente, se la forza penso non corrisponde al valore ipotizzato, il valore di traferro di assetamento sarà diverso da quello prestabilito.

Per mezzo del blocchetto 11, la variazione di massa è simulata per mezzo di un delta di forza equivalente  $\Delta F$ . L'analisi è condotta per un delta di forza positivo ed uno negativo di pari valore (50 N).

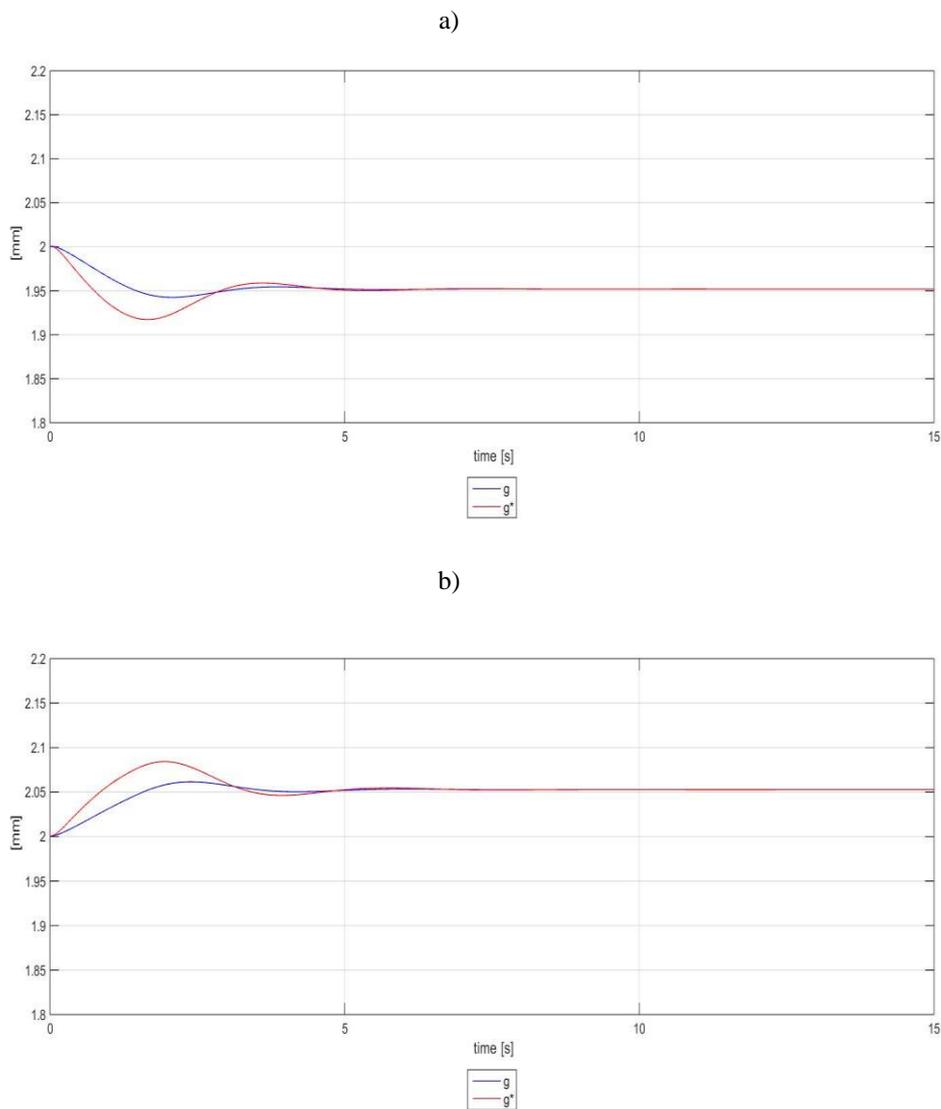
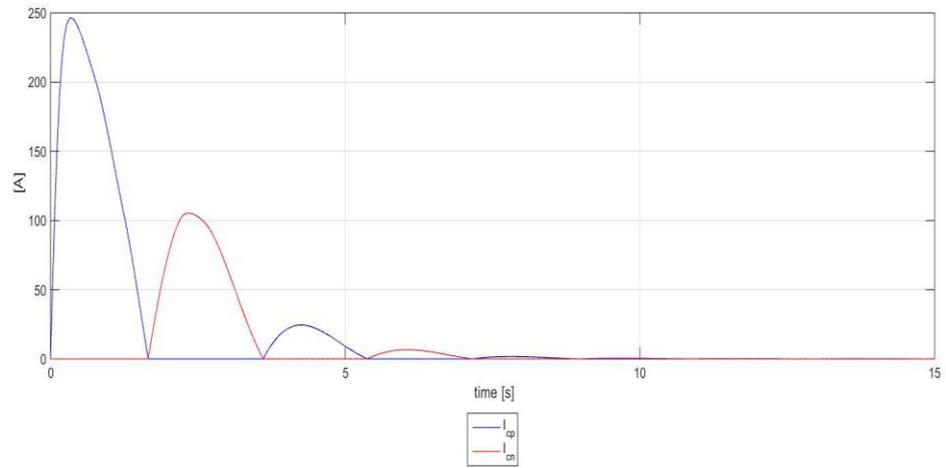


Figura 6.24 – Andamento temporale dei parametri di traferro con: a)  $\Delta F = -50$  N;  
b)  $\Delta F = 50$  N.

a)



b)

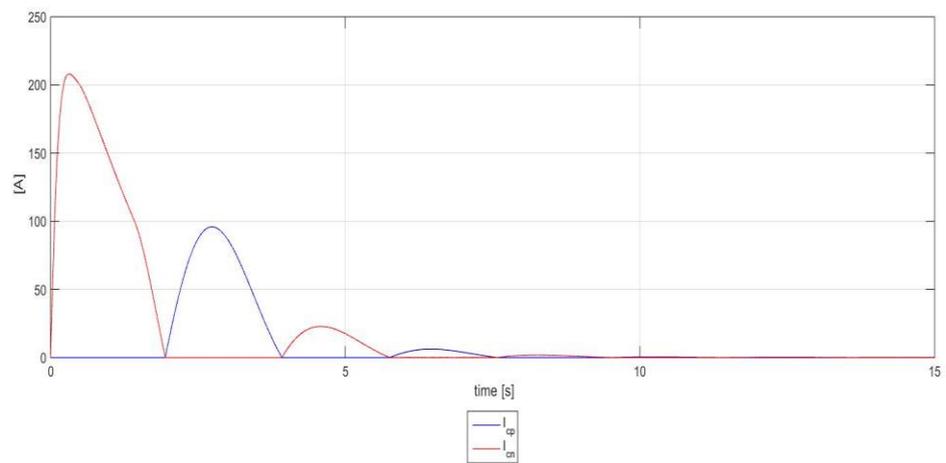


Figura 6.25 – Andamento temporale delle correnti di controllo con: a)  $\Delta F = -50$  N;  
b)  $\Delta F = 50$  N.

Anche in questo caso, i due andamenti di Figura 6.24 e 6.25 sono simmetrici e portano al riposizionamento di traferro a correnti nulle in meno di 10 s.

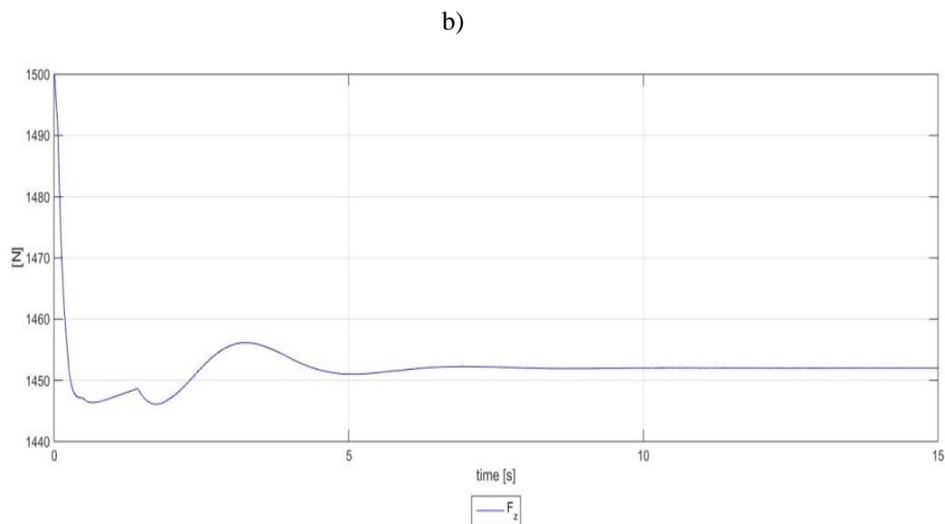
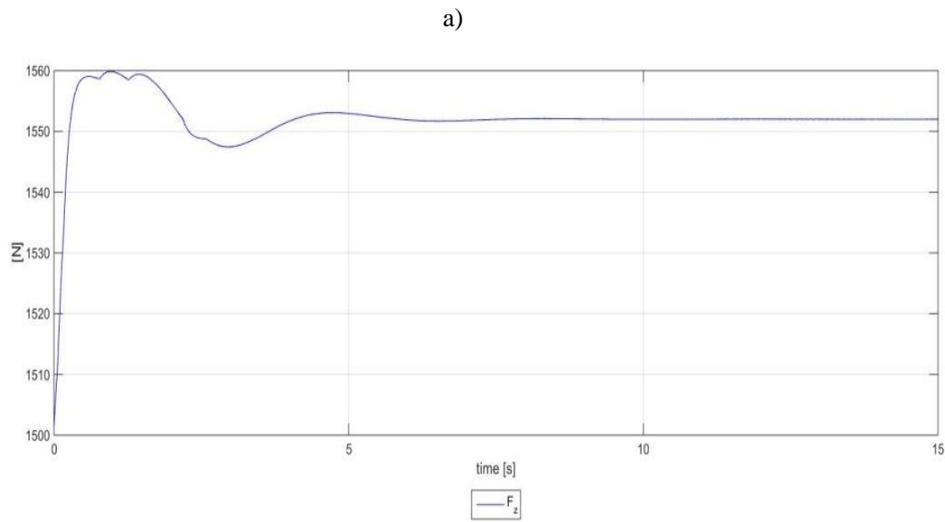


Figura 6.26 – Andamento temporale della forza totale di levitazione con: a)  $\Delta F = -50$  N;  
b)  $\Delta F = 50$  N.

Gli andamenti temporali della forza totale di levitazione  $F_z$  (di Figura 6.26) presentano delle ondulazioni, rapide ed indesiderate dovute ad errori di interpolazione intrinseci nei dati del modello Simulink. Ad ogni modo, a regime,  $F_g = F_z = F_{PM} - \Delta F$ .

### 6.5.5 Variazione di temperatura

Lo scenario qui definito prevede la variazione a rampa della temperatura da 20 °C a 80 °C. Tale situazione è esemplificativa dei fenomeni di riscaldamento legati, per esempio, all'operatività della macchina elettrica o al riscaldamento indotto dall'ambiente esterno. I disturbi  $\Delta z$  e  $\Delta F$  sono considerati nulli.

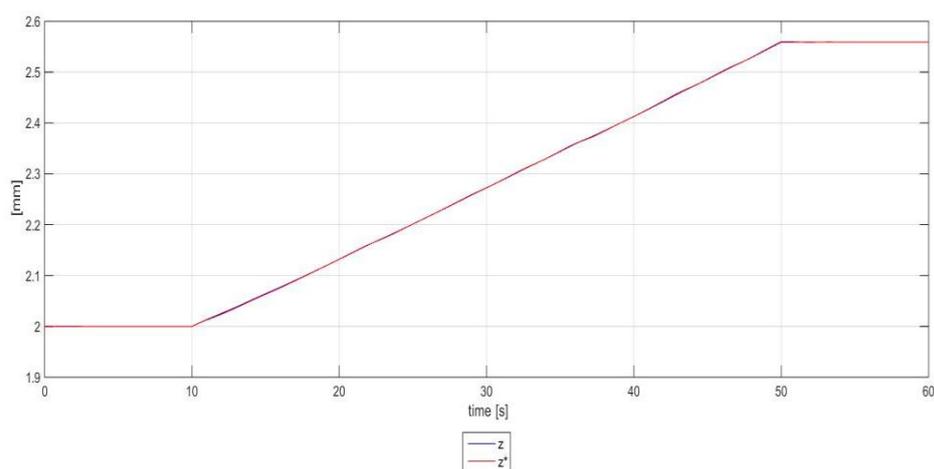


Figura 6.27 – Andamento temporale delle coordinate spaziali z.

L'aumento della temperatura comporta l'aumento del riferimento spaziale  $z^*$  (per simmetria  $g^*$  diminuisce) in quanto l'incremento di temperatura degrada prestazionalmente i magneti indebolendoli. Il volano è dunque portato a lavorare in una posizione più vicina al sistema magnetico di levitazione.

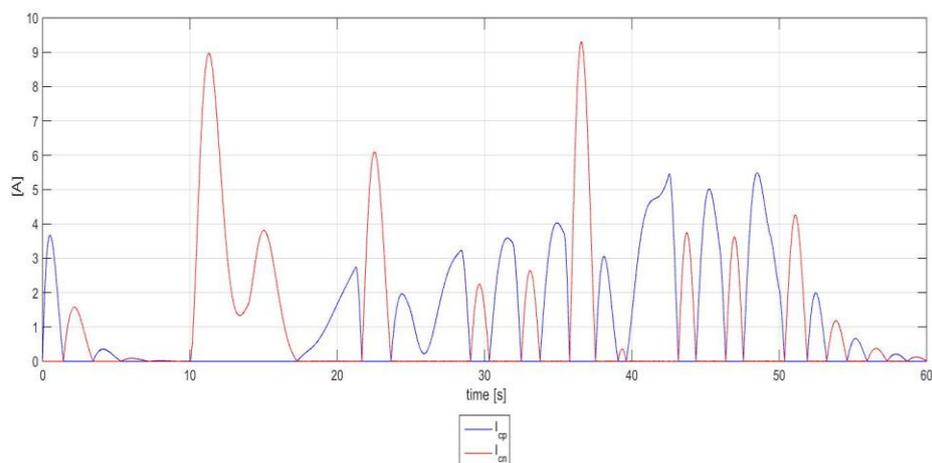


Figura 6.28 – Andamento temporale delle correnti di controllo

L'effetto dei controllori, fa sì che l'errore di trafero sia costantemente prossimo allo zero cioè in condizioni di perfetto inseguimento del riferimento (Figura 6.27) e, una volta raggiunta la temperatura di regime, anche l'annullamento della corrente delle bobine (Figura 6.28).

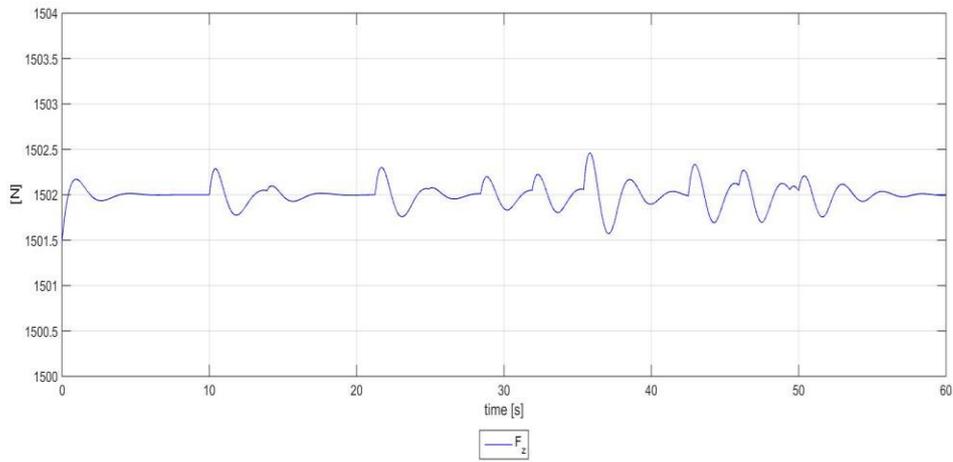


Figura 6.29 – Andamento temporale della forza totale di levitazione

L'oscillazione reale di  $z$  è di bassissimo valore ma richiede comunque l'intervento ripetuto dei sistemi di controllo con conseguente oscillazione della forza totale di sospensione  $F_z$  nell'intorno dei 1502 N di forza (uguaglianza tra la forza messa in gioco dai magneti permanenti e la forza peso del volano).

## 7. Conclusioni

---

Lo scopo principale del lavoro è stato quello di progettare la parte di sospensione verticale di un volano per accumulo stazionario di energia mediante l'utilizzo di un cuscinetto magnetico a controllo attivo.

Come primo aspetto, l'utilizzo del volano stesso come circuito di richiusura delle linee di flusso per la sospensione magnetica, ha consentito un migliore sfruttamento in termini di superfici e volumi, senza dover aggiungere al layout un'ulteriore parte metallica (per esempio un disco). Inoltre, per quanto riguarda la progettazione elettromagnetica del sistema, è stata verificata l'impossibilità di realizzare un unico sistema (posto sulla superficie superiore del volano) capace di controllare, sia in attrazione che in repulsione, la forza agente sul volano. Pertanto, si ritiene fondamentale aver adottato e sviluppato un modello di cuscinetto magnetico ibrido mediante procedura di ottimizzazione la quale tiene conto direttamente dei parametri elettromagnetici essenziali allo scopo del progetto (forze elettromagnetiche, correnti, ecc.) e, indirettamente, dell'aspetto economico legato ai volumi e dunque ai costi dei materiali.

Infine si è implementato il modello del cuscinetto magnetico in Simulink. La realizzazione del sistema di controllo, ha consentito la trasduzione del modello dinamico del sistema precedentemente progettato, il quale ben si adatta a variazioni di temperatura, di forza e di traferro nell'intorno della posizione (traferro) di equilibrio, minimizzando le perdite. Nel complesso la risposta è rapida e priva di errore.

Possibili sviluppi futuri per completare il progetto del cuscinetto:

- Progettazione del sistema di controllo radiale integrato a quello verticale (con la possibile interconnessione delle bobine);
- Valutazione dell'effettiva applicabilità del controllo delle bobine in termini di tensione del convertitore;
- Studiare se vi è qualche influenza della rotazione nella sospensione magnetica.



## 8. Bibliografia

---

- [1] Lafoz Pastor, M.; Garcia-Tabares Rodriguez, L.; Vazquez Velez, C., "Flywheels Store to Save: Improving railway efficiency with energy storage.," *Electrification Magazine, IEEE* , vol.1, no.2, pp.13,20, Dec. 2013
- [2] RSE Spa, *L'accumulo di energia elettrica*, Il Melograno Editore srl, Italia, 2011
- [3] Andrei Jigailo, "Accumulo dell'Energia ad Aria Compressa sott'acqua", Tesi magistrale, Università degli Studi di Padova, Italia, 2013-2014
- [4] EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834
- [5] Pena-Alzola, R.; Sebastian, R.; Quesada, J.; Colmenar, A., "Review of flywheel based energy storage systems," *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on* , vol., no., pp.1,6, 11-13 May 2011
- [6] <http://www.beaconpower.com>
- [7] <http://www.eere.energy.gov/femp/>
- [8] <http://www.alstom.com>
- [9] R. J. Hayes, J.P. Kajs, R.C. Thompson, J.H. Beno, "Design and Testing of Flywheel Battery for a Transit Bus", SAE International Congress and Exposition, Detroit, March 1999
- [10] EPRI-DOE Handbook of Energy Storage for Transmission and Distribution Applications, EPRI, Palo Alto, CA, and the U.S. Department of Energy, Washington, DC: 2003. 1001834.
- [11] <http://www.afstrinity.com>
- [12] <http://www.piller.com>
- [13] <http://www.waukbearing.com>
- [14] J.W. Beams. High rotation speeds. *J. Applied Physics*, 8:795–806, 1937
- [15] F.T. Holmes. Axial magnetic suspension. *Rev. Sci. Inst.*, 8:444–447, 1937
- [16] Earnshaw, S., "On the Nature of the Molecular Forces which Regulate the Constitution of the Luminiferous Ether", *Trans. Camb. Phil. Soc.*, pp 97-112 (1842)
- [17] H. Bleuler. A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types. *JSME Internat. Journal Series III*, 35(3), Sept. 1992
- [18] Gerhard Schweitzer, Eric H. Maslen (Eds.), *Magnetic Bearings*, Springer, Germany, 2009
- [19] Werfel, F.N.; Floegel-Delor, U.; Riedel, T.; Rothfeld, R.; Wippich, D.; Goebel, B., "HTS Magnetic Bearings in Prototype Application," *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* , vol.20, no.3, pp.874,879, June 2010
- [20] <http://www.micro-epsilon.com>

- [21] [http://it.wikipedia.org/wiki/Sensore\\_di\\_prossimità](http://it.wikipedia.org/wiki/Sensore_di_prossimità)
- [22] M. Spezzapria, “Simulazione numerica del processo di tempra ad induzione di ruote dentate per l’industria aeronautica”, Tesi Magistrale, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 2011/2012
- [23] [https://www.hkcm.de/HKCM\\_demag\\_data.php?l=en&gr=35H](https://www.hkcm.de/HKCM_demag_data.php?l=en&gr=35H)
- [24] <http://www.ansys.com>
- [25] Emdadul Hoque and Takeshi Mizuno (2010). Magnetic Levitation Technique for Active Vibration Control, Magnetic Bearings, Theory and Applications, Bostjan Polajzer (Ed.), ISBN: 978-953-307-148-0, InTech, Available from: <http://www.intechopen.com/books/magnetic-bearings--theory-and-applications/magnetic-levitation-technique-for-active-vibration-control>
- [26] Hengkun Liu; Xiao Zhang; Wensen Chang, "PID Control to Maglev Train System," *Industrial and Information Systems, 2009. IIS '09. International Conference on* , vol., no., pp.341,343, 24-25 April 2009
- [27] Davide Meneghel, “Regolatori PID: tecniche di sintesi e problematiche implementative”, Tesi Magistrale, Università degli Studi di Padova, Anno Accademico 2009/2010
- [28] Yang Guang; Zhang Jian-Min, “PD Control Strategy Design and Simulation of Magnetic Bearing with Single Freedom of Degree”, *Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Computer Science and Electronics Engineering (ICCSEE)*, Atlantis Press, Paris, France, pp.2922-2925, 2013

