

POLITECNICO DI TORINO

Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica



**Politecnico
di Torino**

Tesi di Laurea Magistrale

PROGETTAZIONE E VALIDAZIONE SPERIMENTALE DI UN ENERGY HARVESTER ELETTROMECCANICO

Relatori:

Prof. Maurizio REPETTO

Ing. Andrea BOTTEGA

Ing. Paolo SQUILLARI

Candidato:

Fabrizio MANA

Ottobre 2025

Sommario

Nel presente lavoro di tesi magistrale si prosegue lo sviluppo del progetto di un Energy Harvester elettromeccanico denominato *Harvey*, avviato nel 2021^[1] dal Politecnico di Torino, in collaborazione con SKF Group, nell'ambito del progetto *"PNRR M4C2, Investimento 1.4 - Avviso n. 3138 del 16/12/2021 - CN00000022 National Research Centre for Agricultural Technologies (Agritech) Spoke 6 - CUP E13C22001010001"*.

L'obiettivo della ricerca è la generazione di energia elettrica tramite un sistema di magneti permanenti e bobine alloggiati rispettivamente nello statore e nel rotore, al fine di alimentare un modulo Bluetooth Low Energy (BLE) destinato al monitoraggio in tempo reale dei dischi di semina, riducendo i fermi macchina e semplificando le operazioni di manutenzione.

In questa tesi è stato ricostruito da zero il modello tridimensionale dell'*Harvey* sul software CST Studio Suite, parametrizzando tutte le quote geometriche di lamina, bobine, magneti e viti. Sono state quindi introdotte dodici viti in corrispondenza delle dodici bobine collegate in serie, al fine di incrementare il flusso concatenato e la tensione indotta. È stato osservato che tale modifica, se da un lato incrementa la potenza e la tensione disponibile per l'elettronica, dall'altro aumenta la coppia magnetica agente sui magneti dello statore, che non è vincolato rigidamente, ma mantiene la posizione per inerzia grazie a tre pesi di bilanciamento.

Sono state condotte simulazioni parametriche magnetostatiche per calcolare, al variare della posizione meccanica del rotore, il flusso concatenato da ciascuna bobina e la coppia agente su ciascun magnete per diversi valori di traferro e lunghezza delle viti. I dati ottenuti sono stati esportati e successivamente elaborati, combinandoli per ottenere la tensione complessiva ai capi della serie delle dodici bobine e la coppia totale agente sullo statore.

Successivamente è stato assemblato il banco prova precedentemente progettato che comprende l'*Harvey*, il motore primo e il controllo di velocità. Sono state

eseguite prove sperimentali variando lunghezza delle viti e traferro per identificare configurazioni in grado di garantire tensione sufficiente per l'alimentazione del PCB e, al contempo, limitare le oscillazioni dello statore per evitare la sua rotazione. Infine sono stati eseguiti test elettrici a diverse velocità di rotazione, misurando la tensione e ricavando la potenza erogata su un carico resistivo.

I risultati ottenuti indicano la possibilità di incrementare la tensione disponibile mediante l'ottimizzazione delle viti e del traferro, senza compromettere significativamente la stabilità dello statore. Questo lavoro rappresenta un passo fondamentale verso la validazione sperimentale del sistema e fornisce indicazioni utili per attività future, tra cui la caratterizzazione dell'*Harvey* tramite PXIe e l'analisi armonica delle coppie agenti sui magneti per una più approfondita comprensione del comportamento del sistema.

Indice

Elenco delle tabelle	v
Elenco delle figure	vi
1 Introduzione	1
2 Panoramica delle tecnologie esistenti	3
2.1 Weighted-Rotor Energy Harvester	3
2.2 Energy harvester integrato per calzature	4
2.3 Considerazioni sulle soluzioni esistenti	5
3 Struttura e Vincoli di Progetto	6
3.1 Contesto e Obiettivi	6
3.2 Vincoli Geometrici e di Integrazione	6
3.3 Architettura del Sistema	7
3.3.1 Rotore	8
3.3.2 Statore	8
3.3.3 Custodia protettiva	10
3.4 Principio di Funzionamento	10
3.5 Caratteristiche Elettromagnetiche	10
4 Parametrizzazione su CST	12
4.1 Descrizione del modello e dei parametri	12
5 Analisi delle diverse configurazioni CST con differenti valori dei parametri	17
6 Elaborazione risultati ottenuti dalle analisi CST	55
6.1 Grafici di flusso concatenato e calcolo della tensione indotta	56
6.2 Grafici di coppia agente sui magneti e calcolo della coppia totale	60

7	Assemblaggio banco di prova	62
7.1	Progettazione del banco di prova	62
7.1.1	Regime di funzionamento invertito (Configurazione <i>Reversed</i>)	63
7.1.2	Regime di funzionamento normale (Configurazione <i>Normal</i>)	65
7.1.3	Costruzione del Prototipo dell'Harvey	66
7.2	Struttura del banco di prova installato in laboratorio e controllo del motore primo	69
8	Progettazione dell'interfaccia elettronica (PCB)	77
8.1	Architettura del circuito stampato	78
8.2	Descrizione dei sottocircuiti	79
8.2.1	Stadio di conversione AC/DC	79
8.2.2	Regolatore DC/DC	80
8.2.3	Circuito di monitoraggio rotazione	80
8.2.4	Modulo Bluetooth BlueNRG-M2	81
8.2.5	Tabella dei componenti principali (BOM)	82
8.3	Integrazione nel sistema	82
8.4	Test preliminari	83
8.5	Produzione e assemblaggio del PCB	84
8.6	App Android per comunicazione con trasmettitore BLE da smartphone	85
9	Prove sperimentali e configurazione finale	88
9.1	Prove elettriche	88
9.2	Prove meccaniche	91
9.3	Configurazione finale	94
10	Conclusioni	96
	Bibliografia	99

Elenco delle tabelle

3.1	Caratteristiche geometriche delle bobine	11
3.2	Caratteristiche dei magneti permanenti	11
5.1	Valori parametri di input con corrispondenza ai nomi utilizzati in CST	21
5.2	Parametri di Mesh e Background	21
5.3	Proprietà del materiale Mu-Metal	22
5.4	Proprietà del materiale N50 (sintered NdFeB)	23
5.5	Parametri di controllo delle viti	26
5.6	Proprietà del materiale Ferro	32
5.7	Valori parametri di input con corrispondenza ai nomi utilizzati in CST	47
5.8	Calcolo dei parametri delle viti nelle 5 simulazioni	50
6.1	Valori di flusso e tensione relativi alla configurazione 15	58
6.2	Valori di flusso e tensione relativi alla configurazione 17	60
7.1	Parametri principali di motore e riduttore utilizzati nel banco di prova	71
8.1	Bill of Materials (componenti principali per l'assemblaggio di cinque PCB)	83
9.1	Caratterizzazione elettrica con <code>gap</code> di 2 mm, lamina in ferro di 4 mm, <code>lvite</code> pari a 12 mm	89
9.2	Caratterizzazione elettrica della prova finale di Cavallo ^[4] con <code>gap</code> di 1 ÷ 1.5 mm, lamina in Mu-Metal di 1.5 mm, in assenza di viti (<code>lvite</code> = 0 mm)	90

Elenco delle figure

1.1	Seminatrice agricola (fonte: ilnuovoagricoltore.it)	2
1.2	Disco di semina (a) e SKF Agri Hub S20 (b) (fonti: utilajetractor.ro (a) skf.com (b))	2
2.1	Schema tridimensionale del WREH ^[2]	4
2.2	Componenti principali del sistema indossabile ^[3]	4
3.1	Disegno tecnico del componente <i>SKF Agri Hub S20</i> (fonte: SKF.com)	7
3.2	Assieme completo del sistema <i>Harvey</i>	8
3.3	Vista esplosa del rotore e dei suoi componenti	9
3.4	Percorso di connessione delle bobine all'interno del rotore	9
3.5	Vista dello statore: (a) lato magneti, (b) lato masse di ottone	10
4.1	Parametrizzazione magneti permanenti di statore	13
4.2	Parametrizzazione componenti di rotore	14
4.3	Numerazione magneti permanenti di statore	15
4.4	Numerazione bobine di rotore	15
4.5	Parametrizzazione sezione A-A del rotore e dei magneti	16
4.6	Parametrizzazione sezione B-B del rotore	16
5.1	Geometria della configurazione 3	18
5.2	Impostazione della variazione del parametro <i>alphasecircle</i>	18
5.3	Rappresentazione del modulo dell'induzione magnetica	19
5.4	Andamento del flusso concatenato da ogni bobina in un periodo	19
5.5	Configurazione e polarità dei magneti	23
5.6	Mesh della configurazione 3	24
5.7	Background della configurazione 3	25
5.8	Configurazione ottimale di polarità delle 12 bobine	25
5.9	Modello geometrico con viti inserite e definite in materiale aria	26
5.10	Vista in sezione frontale della configurazione 4	27
5.11	Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 3 (a) e 4 (b)	28

5.12	Modello con lamina e viti definite in Mu-Metal	29
5.13	Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 3 (a) e 5 (b)	30
5.14	Confronto del flusso concatenato 1D (bobine 1-6) tra la configurazione 3 (a) e 5 (b)	31
5.15	Modulo di induzione magnetica della configurazione 6	32
5.16	Andamento di flusso concatenato (bobine 1-6) della configurazione 6	33
5.17	Modulo di induzione magnetica della configurazione 8	34
5.18	Andamento di flusso concatenato (bobine 1-6) della configurazione 8	34
5.19	Introduzione della non linearità su viti e lamina	35
5.20	Caratteristica magnetica $B(H)$	35
5.21	Confronto tra le curve di permeabilità	36
5.22	Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 6 (a) e 9 (b)	36
5.23	Confronto del flusso concatenato 1D (bobine 1-6) tra la configurazione 6 (a) e 9 (b)	37
5.24	Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1	38
5.25	Condizioni al contorno “electric, $E_t = 0$ ”	38
5.26	Condizioni al contorno “magnetic, $H_t = 0$ ”	39
5.27	Collocazione CST dei grafici di coppia agente sui magneti	40
5.28	Andamento della coppia agente sul magnete 1N	41
5.29	Andamento della coppia agente su ognuno degli 8 magneti selezionati	41
5.30	Vista in sezione frontale della configurazione 13	42
5.31	Geometria della configurazione 13 con gap = 1 mm	42
5.32	Modulo di induzione magnetica con gap = 1 mm	43
5.33	Modulo di induzione magnetica con gap = 1.5 mm	43
5.34	Modulo di induzione magnetica con gap = 2 mm	44
5.35	Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 con gap = 2 mm	44
5.36	Andamento della coppia agente sul magnete 1N con gap = 2 mm	45
5.37	Geometria della configurazione 14 con gap = 1 mm	45
5.38	Modulo di induzione magnetica con gap = 2 mm	46
5.39	Geometria della configurazione 14 con gap = 2 mm	46
5.40	Modulo di induzione magnetica con gap = 2 mm	48
5.41	Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 per differenti valori di gap	48
5.42	Andamento della coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di gap	49
5.43	Andamento di un periodo completo di coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di gap	50
5.44	Geometria della configurazione 17 con percentgap = -3	51
5.45	Geometria della configurazione 17 con percentgap = -9	51

5.46	Geometria della configurazione 17 con <code>percentgap = -12</code>	52
5.47	Modulo di induzione magnetica con <code>percentgap = -9</code>	52
5.48	Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 per differenti valori di <code>percentgap</code>	53
5.49	Andamento della coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di <code>percentgap</code>	53
6.1	Andamento del flusso concatenato dalla bobina e dall'avvolgimento con <code>gap</code> pari a 2 mm	57
6.2	Andamento del flusso concatenato totale per differenti valori di <code>gap</code> (<code>percentgap = 0</code>)	58
6.3	Andamento del flusso concatenato totale per differenti valori di <code>percentgap</code> (<code>gap = 1 mm</code>)	59
6.4	Andamento della coppia sul magnete 1N per differenti valori di <code>gap</code> (<code>percentgap = 0 mm</code>)	61
6.5	Andamento della coppia sul magnete e sullo statore con <code>gap</code> pari a 1 mm	61
7.1	Schema concettuale del banco di prova	62
7.2	Banco prova in regime di funzionamento invertito	63
7.3	Configurazione di <i>Harvey</i> per il regime di funzionamento inverso.	64
7.4	Boccola fissata al mozzo mediante quattro viti.	64
7.5	Banco prova in regime di funzionamento normale.	65
7.6	Configurazione di <i>Harvey</i> per il regime di funzionamento normale.	65
7.7	Assemblaggio dell'SKF AgriHub S20 e del case del rotore	66
7.8	(a) Magneti permanenti, (b) bobine, (c) masse di ottone, (d) anelli di fermo e boccola.	67
7.9	Inserimento delle bobine nel case del rotore	68
7.10	Inserimento dei magneti e delle masse di piombo nel case dello statore	68
7.11	Seconda versione del banco prova con statore modificato	69
7.12	Postazione del banco di prova	70
7.13	Banco di prova in assenza di <i>Harvey</i>	71
7.14	Schema concettuale del banco di prova con motore, riduttore e albero in uscita	72
7.15	Confronto tra banco prova progettato e reale in configurazione <i>normal</i>	72
7.16	Collegamento albero-rotore configurazione <i>normal</i>	72
7.17	Confronto tra banco prova progettato e reale in configurazione <i>reversed</i>	73
7.18	Flangia di accoppiamento realizzata per la configurazione <i>reverse</i>	73
7.19	Modulo driver brushless installato nel quadro elettrico	74
7.20	Schermata <i>Remote operation</i> del software MEXE02 Ver.4	74
7.21	Attivazione <i>Remote operation mode</i>	75

7.22	Sezione <i>Remote operation</i>	75
8.1	Schema a blocchi del circuito elettronico del PCB	78
8.2	Schema del circuito elettronico sviluppato in <i>Altium Designer</i>	79
8.3	Convertitore AC/DC per alimentazione Buck	79
8.4	Convertitore DC/DC per alimentazione modulo BLE	80
8.5	Convertitore AC/DC per monitoraggio rotazione	80
8.6	Modulo Bluetooth BlueNRG-M2SA (fonte: <i>STMicroelectronics</i>) . . .	81
8.7	Schema del trasmettitore BLE	81
8.8	Assemblaggio PCB e distanziale	82
8.9	PCB finale, risultato della fase di produzione	84
8.10	PCB dopo la saldatura della maggior parte dei componenti	85
8.11	Schermata del Designer di MIT App Inventor relativa all'app svi- luppata per la connessione al trasmettitore BLE e la lettura della tensione.	86
8.12	Estratto dei blocchi di codice implementati in MIT App Inventor per la connessione al trasmettitore BLE e la lettura della tensione. .	87
9.1	Configurazione <i>reversed</i> impiegata per le prove elettriche	88
9.2	Configurazione <i>normal</i> impiegata per le prove meccaniche	91
9.3	Posizione di equilibrio attorno a cui lo statore oscilla	93

Capitolo 1

Introduzione

Negli ultimi anni, l'evoluzione rapida delle tecnologie digitali ha imposto cambiamenti significativi in molti settori industriali. Se in ambiti come l'informatica, la manifattura, la finanza e il commercio al dettaglio l'innovazione è stata adottata rapidamente come leva strategica, in agricoltura tale processo si è sviluppato più lentamente, lasciando ampi margini di miglioramento.

L'AgriTech rappresenta la fusione tra pratiche agricole tradizionali e strumenti tecnologici avanzati, con l'obiettivo di aumentare l'efficienza dei processi, garantire una maggiore sostenibilità e sicurezza, ridurre i tempi di lavorazione e ottimizzare la gestione delle macchine. Questo approccio apre nuove opportunità per innovazioni capaci di trasformare le attività agricole.

Il lavoro qui presentato si concentra sullo sviluppo di un dispositivo elettromeccanico progettato per velocizzare il rilevamento di eventuali malfunzionamenti di una seminatrice (Figura 1.1). Il progetto è frutto della collaborazione tra studenti e docenti del Politecnico di Torino e il gruppo SKF.

L'attenzione del progetto è rivolta all'assemblaggio formato dal disco di semina (Figura 1.2 (a)) e dal componente *SKF Agri Hub S20* (Figura 1.2 (b)), destinato a ospitare il meccanismo di raccolta dell'energia cinetica. Questo sistema converte il movimento rotatorio del disco in energia elettrica, alimentando un trasmettitore Bluetooth che invia informazioni al controllo centrale del trattore. La ricezione del segnale indica il corretto funzionamento del disco, mentre la sua assenza genera un allarme per l'operatore, segnalando la necessità di interventi di manutenzione.

Il dispositivo *Harvey* rappresenta una soluzione sostenibile per il monitoraggio in tempo reale delle operazioni della macchina. Grazie alla conversione dell'energia cinetica in energia elettrica, è possibile ridurre notevolmente sia i tempi sia le risorse necessarie per la diagnostica, aumentando l'efficienza complessiva e l'affidabilità del sistema.



Figura 1.1: Seminatrice agricola
(fonte: ilnuovoagricoltore.it)



(a)



(b)

Figura 1.2: Disco di semina (a) e SKF Agri Hub S20 (b)
(fonti: utilajetractor.ro (a) skf.com (b))

Capitolo 2

Panoramica delle tecnologie esistenti

La progettazione del sistema *Harvey* richiede la considerazione di vincoli specifici, imposti sia dalle caratteristiche operative richieste al dispositivo sia dall'utilizzo del componente *SKF Agri Hub S20*. Queste condizioni rendono necessaria la realizzazione di un prodotto differente rispetto alle soluzioni di energy harvesting già disponibili sul mercato. Tuttavia, un'analisi delle tecnologie esistenti è fondamentale per identificare strategie progettuali efficaci. In questo capitolo vengono discussi alcuni dei dispositivi più rilevanti.

2.1 Weighted-Rotor Energy Harvester

Gli energy harvester cinetici tradizionali tendono a essere sensibili alla frequenza, mostrando una trasmissione di potenza efficiente solo in corrispondenza della loro frequenza naturale. Il *Weighted-Rotor Energy Harvester* (WREH, Figura 2.1) rappresenta un approccio in grado di adattare la propria frequenza naturale per ottimizzare la raccolta di energia cinetica da una ruota in rotazione. Il principio di funzionamento sfrutta la variazione periodica della componente tangenziale della gravità, inducendo un movimento oscillatorio nel rotore pesato.

Il rotore integra un array di magneti di tipo Halbach circolare ottimizzato, che consente una distribuzione uniforme del flusso magnetico e una massimizzazione della forza elettromotrice indotta. L'energia meccanica viene convertita in elettrica grazie alle bobine montate sullo statore, attraverso il principio dell'induzione elettromagnetica. Il sistema può adattarsi a diverse velocità della ruota regolando la distanza tra il punto di fulcro del rotore e il suo centro di massa mediante una vite di regolazione.

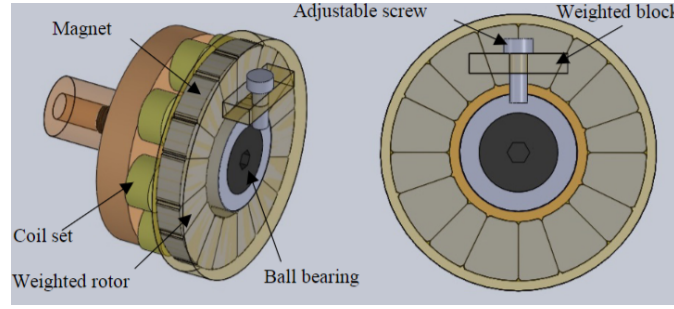


Figura 2.1: Schema tridimensionale del WREH^[2]

Sperimentazioni hanno mostrato che, nonostante le dimensioni ridotte del dispositivo (raggio 75 mm, altezza 25 mm), esso è in grado di generare potenze comprese tra 399 e 535 μW per velocità della ruota comprese tra 300 e 500 rpm, corrispondenti a densità di potenza tra circa 0,903 e 1,211 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$ ^[2].

2.2 Energy harvester integrato per calzature

Un altro esempio riguarda un dispositivo indossabile integrato nella suola di una scarpa da corsa, progettato per alimentare un pedometro Bluetooth (Figura 2.2). In questo caso, l'energia cinetica generata dall'impatto del tallone con il terreno provoca l'oscillazione di un magnete permanente, che induce corrente nelle bobine secondo la legge di Faraday. La corrente alternata così generata viene rettificata e accumulata in un condensatore, fornendo energia per il trasmettitore.



Figura 2.2: Componenti principali del sistema indossabile^[3]

Nonostante le dimensioni limitate (diametro 27 mm, altezza 16 mm), il dispositivo recupera circa 300 μJ per passo in condizioni di corsa lenta, rispetto a 400 μJ dissipati su un carico ottimale. La potenza media generata è di 0,54 mW a una frequenza di passo di 1,5 Hz, con una densità di potenza pari a 61 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$. Durante un allenamento, l'energia raccolta per passo raggiunge circa 644 μJ , superando le necessità operative e garantendo una trasmissione costante dei dati. L'efficienza è ulteriormente aumentata grazie a un'ottimizzazione del carico resistivo, che consente

una riduzione delle dimensioni complessive e un miglioramento della compattezza del sistema^[3].

2.3 Considerazioni sulle soluzioni esistenti

La letteratura attuale offre numerosi studi sui dispositivi di energy harvesting naturale, molti dei quali forniscono informazioni preziose per lo sviluppo di sistemi futuri. Tra le soluzioni analizzate, quelle descritte nei paragrafi precedenti sono le più pertinenti rispetto agli obiettivi del presente lavoro, poiché offrono indicazioni sulle possibili prestazioni energetiche e sulla disposizione ottimale dei componenti.

I principali vantaggi di tali sistemi includono l'eliminazione della necessità di batterie e la produzione di energia sostenibile, caratteristiche essenziali per applicazioni in cui l'efficienza e la compattezza sono requisiti fondamentali.

Capitolo 3

Struttura e Vincoli di Progetto

3.1 Contesto e Obiettivi

Il progetto *Harvey* nasce nell’ambito dello sviluppo di soluzioni di energy harvesting per macchine agricole, con l’obiettivo di alimentare il trasmettitore Bluetooth dedicato al monitoraggio del disco di semina. Il sistema è stato concepito per sfruttare l’energia cinetica del movimento rotatorio dei dischi, convertendola in energia elettrica sufficiente per trasmettere in tempo reale lo stato operativo del disco alla scheda principale del sistema di controllo del trattore.

Questo approccio consente di ridurre i tempi di diagnosi di eventuali guasti e di migliorare l’efficienza complessiva delle operazioni di semina. Il progetto si inserisce in un filone di studi già avviato sull’energy harvesting elettromeccanico vibrazionale [3], ma introduce soluzioni costruttive specifiche per l’ambiente agricolo e per l’integrazione con il componente *SKF Agri Hub S20*.

3.2 Vincoli Geometrici e di Integrazione

Poiché l’harvester deve essere direttamente montato sulla boccia-cuscinetto *SKF Agri Hub S20*, il design deve rispettare le dimensioni standard del componente. I vincoli principali sono:

- mantenimento della posizione e del diametro delle sei viti M6 di fissaggio del mozzo al disco di semina, utilizzate anche per fissare l’harvester;
- diametro esterno massimo del rotore pari a 91 mm;
- diametro interno massimo del rotore pari a 54 mm;

- diametro interno minimo della custodia di protezione pari a 91 mm.

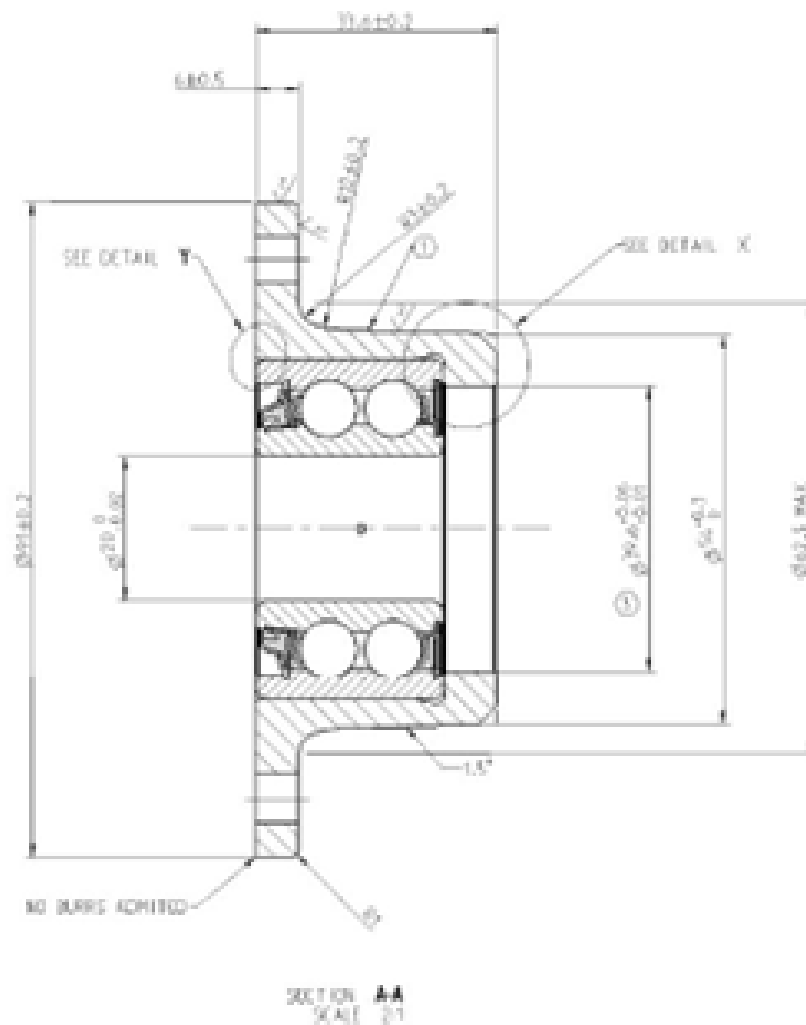


Figura 3.1: Disegno tecnico del componente *SKF Agri Hub S20* (fonte: [SKF.com](https://www.skf.com))

3.3 Architettura del Sistema

L'assieme complessivo di *Harvey* è costituito da tre sottosistemi principali:

1. **Rotore**, solidale alla boccola-cuscinetto;
2. **Statore**, collegato al rotore mediante cuscinetto a sfere;
3. **Custodia protettiva**, che racchiude e protegge l'insieme.

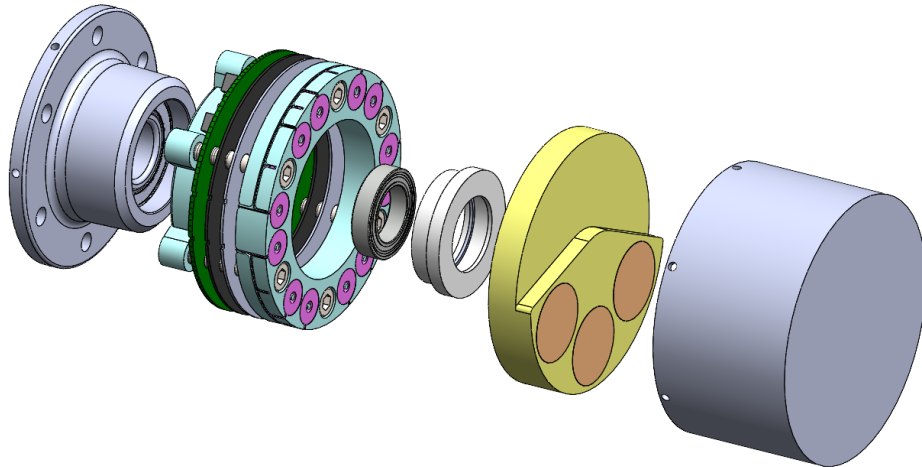


Figura 3.2: Assieme completo del sistema *Harvey*

3.3.1 Rotore

Il rotore è fissato al mozzo tramite sei viti M6 in nylon per minimizzare le interferenze magnetiche. Al suo interno trovano posto:

- un distanziale che crea lo spazio per i componenti elettronici;
- il circuito stampato (PCB) che integra il modulo Bluetooth;
- un anello isolante in PLA per separare elettricamente PCB e bobine;
- una lamina in ferro per convogliare il flusso magnetico verso le bobine e schermare il PCB;
- dodici bobine collegate in serie (caratteristiche in Tabella 3.1);
- una sede per il cuscinetto a sfere e un anello di fermo.

Le bobine sono collegate in serie seguendo un percorso guidato da canali ricavati nel supporto (Figura 3.4). L'estremità della prima e dell'ultima bobina sono connesse direttamente al PCB, garantendo così l'alimentazione del trasmettitore Bluetooth.

3.3.2 Statore

Lo statore è costituito da una sede in cui sono alloggiati:

- 14 magneti permanenti in configurazione alternata di polarità (Tabella 3.2);

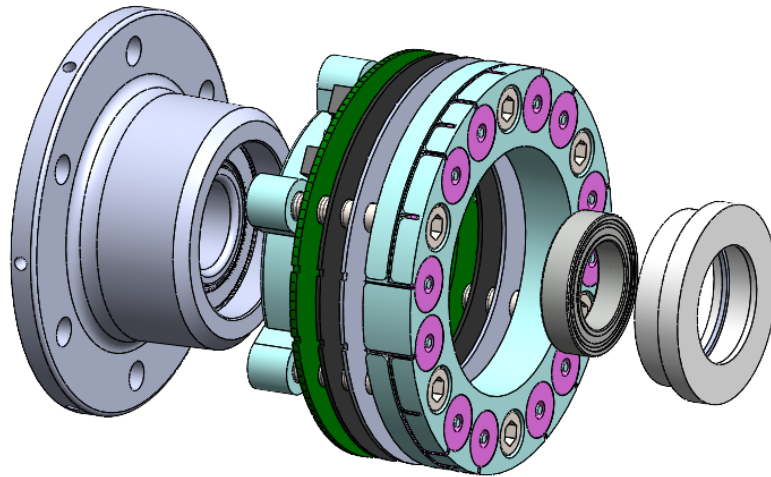


Figura 3.3: Vista esplosa del rotore e dei suoi componenti

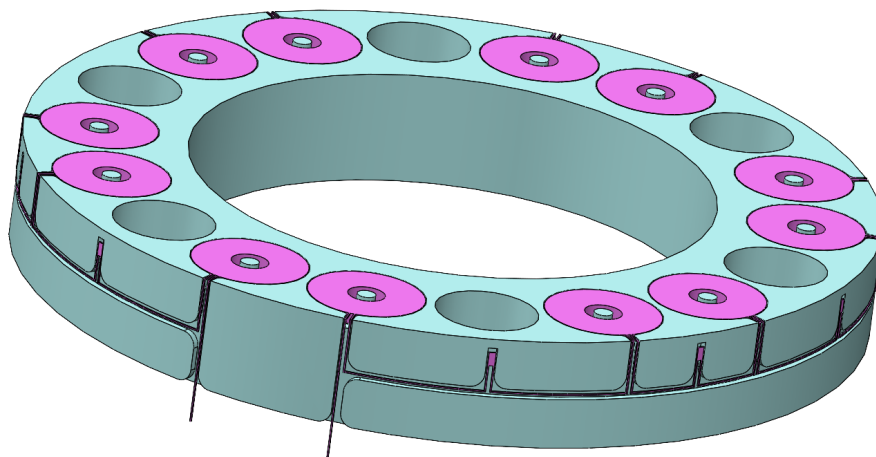


Figura 3.4: Percorso di connessione delle bobine all'interno del rotore

- 3 masse di ottone che ne garantiscono la stabilità e contrastano la coppia agente sui magneti.

La connessione tra statore e rotore è assicurata da un cuscinetto a sfere SKF W 61804-2Z, mantenuto in sede da un anello di fermo DIN 471. L'insieme può ruotare fino a 45° rispetto al rotore, sfruttando l'inerzia delle masse per mantenere la posizione verticale.

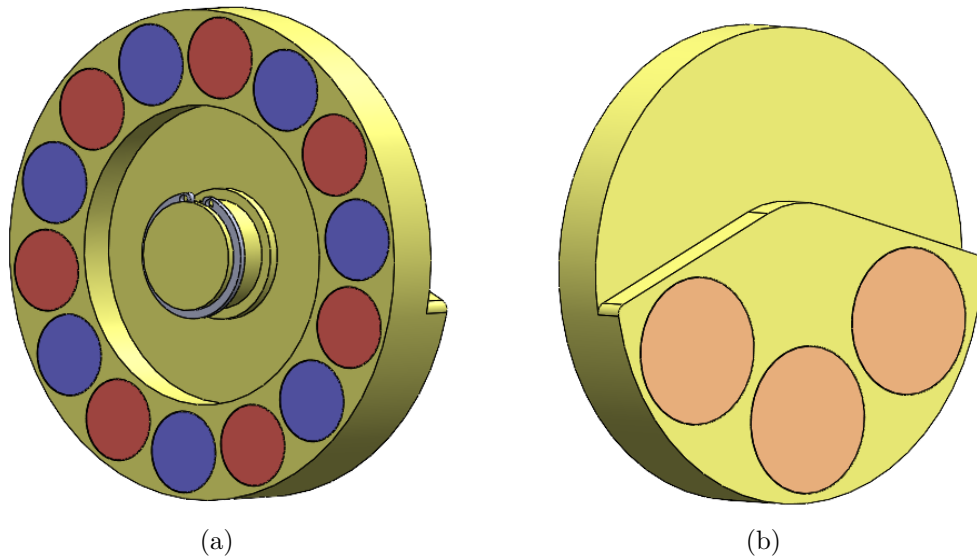


Figura 3.5: Vista dello statore: (a) lato magneti, (b) lato masse di ottone

3.3.3 Custodia protettiva

L'intero sistema è racchiuso da una custodia che lo protegge da polvere, umidità e urti tipici dell'ambiente agricolo.

3.4 Principio di Funzionamento

Il funzionamento si basa sull'induzione elettromagnetica: durante la rotazione del disco di semina, il rotore e le bobine ruotano insieme al mozzo, mentre lo statore resta in posizione grazie alle masse. La variazione del flusso magnetico concatenato induce una forza elettromotrice nelle bobine, generando la tensione necessaria per alimentare il modulo Bluetooth. Se un disco di semina smette di girare, il sistema non produce più energia, e la centralina segnala l'anomalia all'operatore.

3.5 Caratteristiche Elettromagnetiche

Le principali specifiche delle bobine e dei magneti permanenti sono riportate nelle tabelle seguenti.

Tabella 3.1: Caratteristiche geometriche delle bobine

Parametro	Valore	Unità
Numero di bobine	12	–
Altezza	10	mm
Diametro esterno	12.5	mm
Diametro interno	4	mm
Numero di spire	1250	–

Tabella 3.2: Caratteristiche dei magneti permanenti

Parametro	Valore	Unità
Numero di magneti	14	–
Diametro	15	mm
Altezza	8	mm
Materiale	NdFeB	–

Capitolo 4

Parametrizzazione su CST

4.1 Descrizione del modello e dei parametri

Inizialmente, su CST si ricostruisce da zero il modello dell'Harvey, parametrizzando i valori utilizzati nella precedente versione di Cavallo, in modo che si possa testare l'Harvey per diverse configurazioni semplicemente variando il valore dei parametri.

Si creeranno diversi progetti CST nominati “Harvey_Final_x_Mana” al fine di analizzare differenti configurazioni variando i materiali e la geometria attraverso il valore assegnato ai parametri.

Si procede illustrando il nome utilizzato su CST per ogni parametro e la quota a cui corrisponde.

In Figura 4.1, si possono osservare i nomi dei parametri assegnati nel sistema di riferimento Oxy per definire i magneti permanenti a statore, dove *nmagn* indica il numero dei magneti e *Bmagn* il valore di induzione residua dei magneti permanenti. Occorre notare che il sistema di riferimento Oxyz presente nelle figure è coincidente a quello che si osserva su CST. Successivamente si effettuerà una sezione sul piano A-A che verrà visualizzata in seguito in Figura 4.5 insieme ai componenti del rotore.

In Figura 4.2 si possono notare i parametri assegnati nel sistema di riferimento Oxy per definire i vari componenti del rotore: lamina, viti e bobine. In Tabella 3.1 sono state classificate le caratteristiche geometriche delle bobine del rotore. Si osserva l'angolo *alphadegcircle* che definisce la posizione angolare del rotore rispetto l'asse x, variando questo parametro sarà possibile analizzare il flusso concatenato dalle bobine e la coppia esercitata su ogni magnete in funzione della posizione

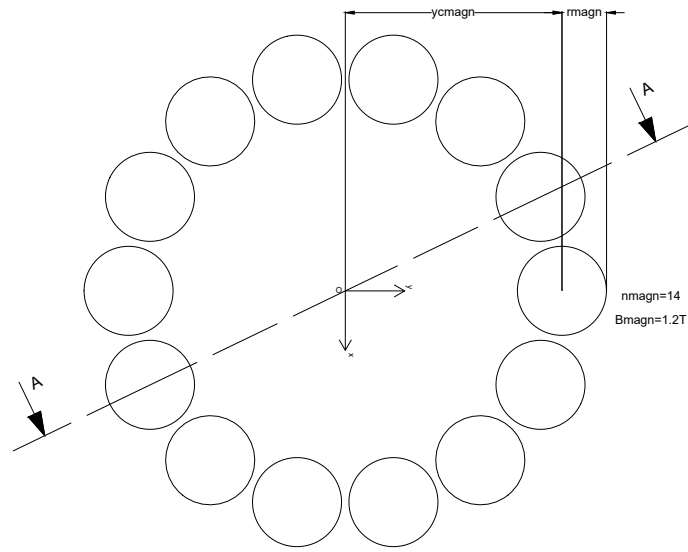


Figura 4.1: Parametrizzazione magneti permanenti di statore

meccanica del rotore. Infatti, su CST, attraverso *Parameter Sweep*, con una sola simulazione, impostando l'intervallo di *alphadegcircle* desiderato, si ottiene la rotazione del rotore: il software CST calcola il valore di tutte le grandezze (per esempio flusso concatenato e coppia) per ogni valore del parametro *alphadegcircle* (con tutti gli altri parametri fissati).

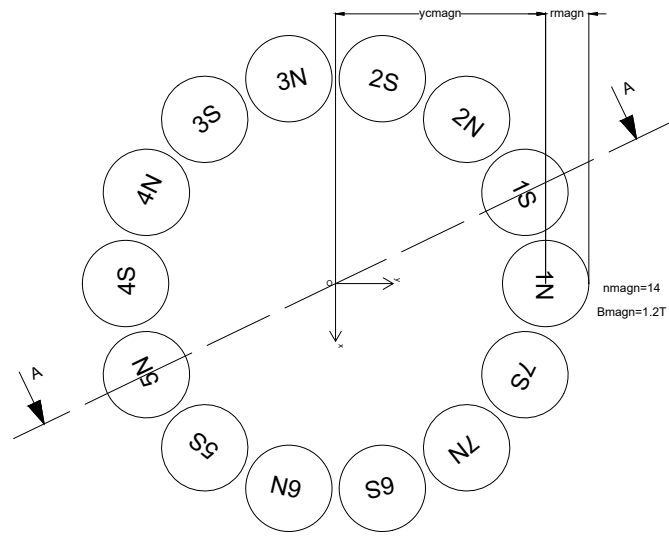


Figura 4.3: Numerazione magneti permanenti di statore

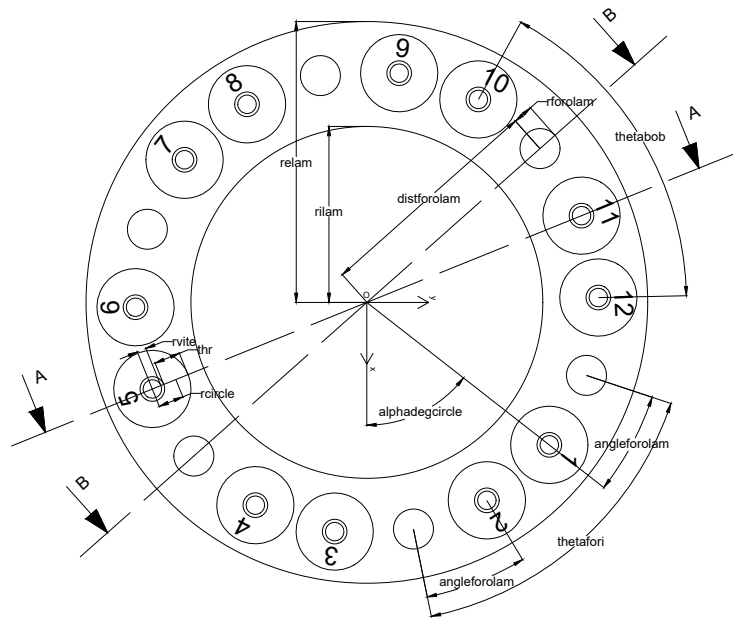


Figura 4.4: Numerazione bobine di rotore

nelle simulazioni che verranno illustrate nel [Capitolo 5](#). In particolare, si dovrebbe impostare un'analisi parametrica con parametro percentgap nel caso si volessero ottenere curve $\lambda_j(\text{alphadegcircle})$ al variare della lunghezza della vite. I principali parametri che verranno fatti variare in questo studio sono gap e alphadegcircle, si otterranno quindi andamenti di flusso concatenato e coppia in funzione di questi due parametri. Tuttavia, in futuro, ogni parametro quotato si può far variare in modo da studiare diverse configurazioni.

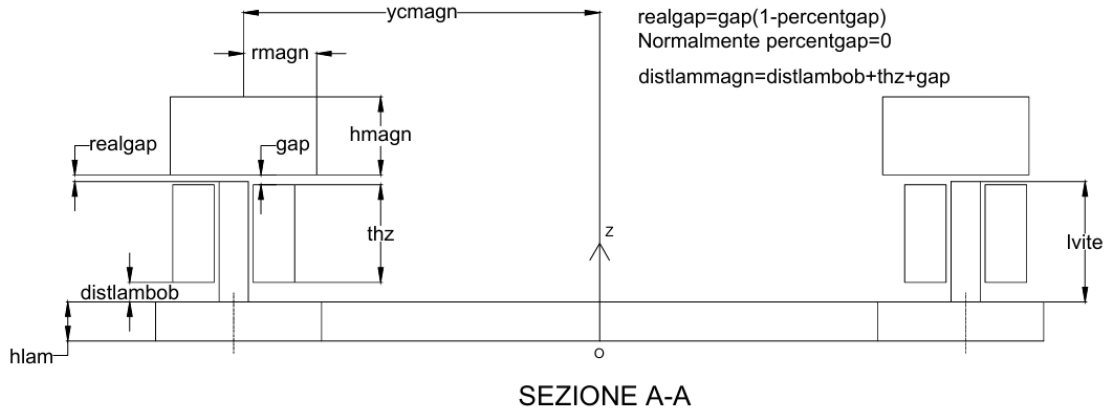


Figura 4.5: Parametrizzazione sezione A-A del rotore e dei magneti

Per completezza viene riportata la Figura 4.6 dove viene illustrata la sezione B-B: qui si osservano due dei sei fori passanti presenti al rotore oltre che lo spessore della lamina hlam.

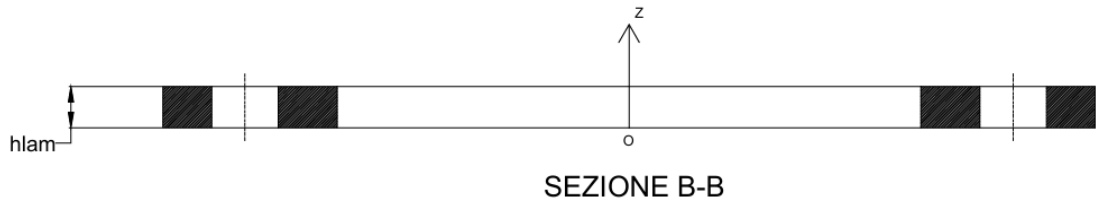


Figura 4.6: Parametrizzazione sezione B-B del rotore

Capitolo 5

Analisi delle diverse configurazioni CST con differenti valori dei parametri

Inizialmente, su CST si ricostruisce da zero il modello dell'Harvey, parametrizzando i valori utilizzati nella precedente versione di Cavallo, in modo che si possa testare l'Harvey per diverse configurazioni semplicemente variando il valore dei parametri. Nel caso in futuro si volessero testare nuove configurazioni è quindi sufficiente modificare i valori dei parametri di input.

In questo capitolo vengono descritte tutte le simulazioni presenti nella cartella “*Harvey_Mana*”.

Configurazione “*Harvey_Final_3_Mana*”

Si parte con la numerazione da 3 dal momento che la versione finale realizzata da Cavallo è “*Harvey_Final_2*”.

In questa configurazione sono stati assegnati come valori dei parametri i dati e le misure utilizzate da Cavallo in modo da poter fare un confronto e verificare che il modello parametrizzato dia gli stessi risultati del caso analizzato nella versione finale di Cavallo. In Figura 5.1 si può osservare la geometria del caso considerato.

Dalla simulazione *Parameter Sweep*, dove si fa variare *alphadegcircle* da 0° a 52° come mostrato in Figura 5.2, sono stati ottenuti gli stessi risultati della versione finale di Cavallo^[4]. Per questo motivo, si riportano soltanto i risultati di questa

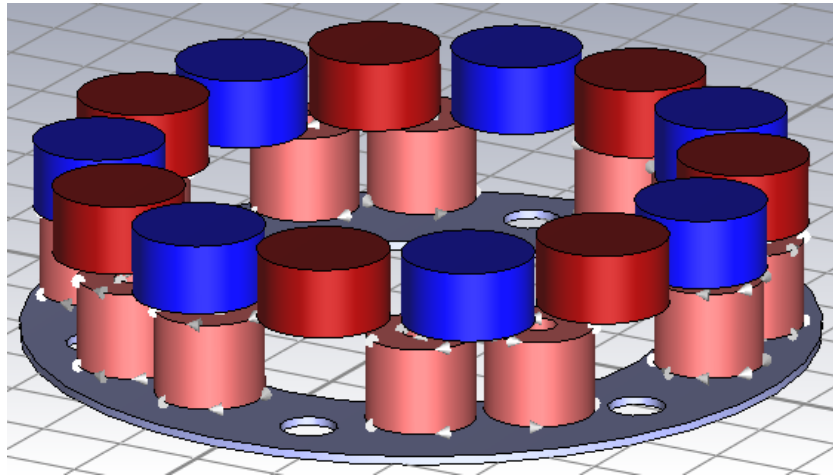


Figura 5.1: Geometria della configurazione 3

nuova configurazione parametrizzata: in Figura 5.3 si osservano i valori di induzione magnetica, mentre gli andamenti di flusso concatenato da ogni bobina sono illustrati in Figura 5.4.

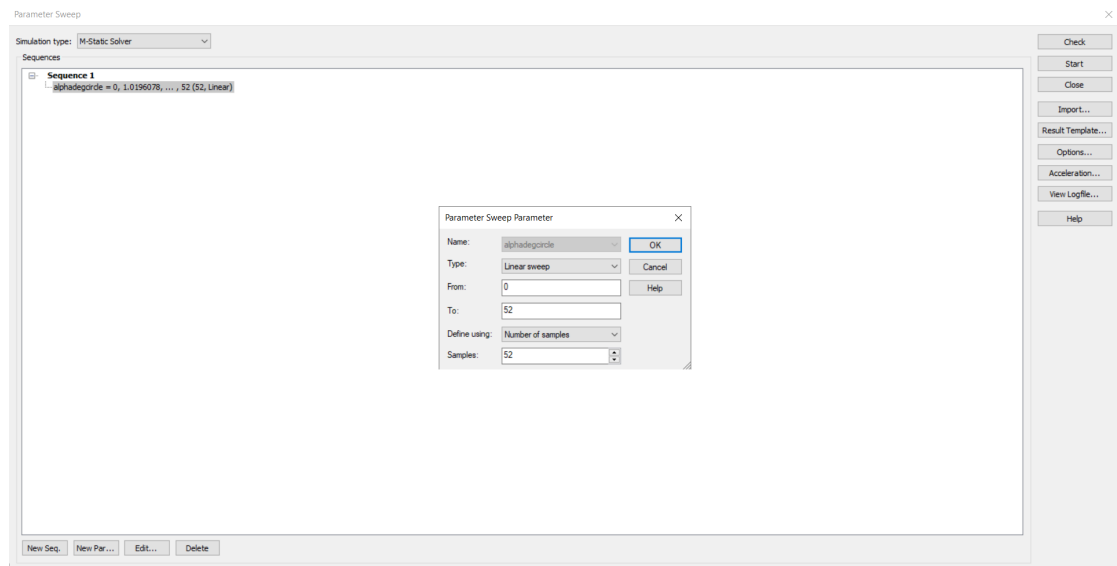


Figura 5.2: Impostazione della variazione del parametro *alphadegcircle*

I valori del modulo di induzione magnetica sono vicini a quelli dell'induzione residua soprattutto vicino ai magneti, nella lamina i valori sono più bassi a causa dell'assenza di materiale magnetico in corrispondenza delle bobine, nonostante la permeabilità molto elevata contribuisca a un maggiore incanalamento/richiusura

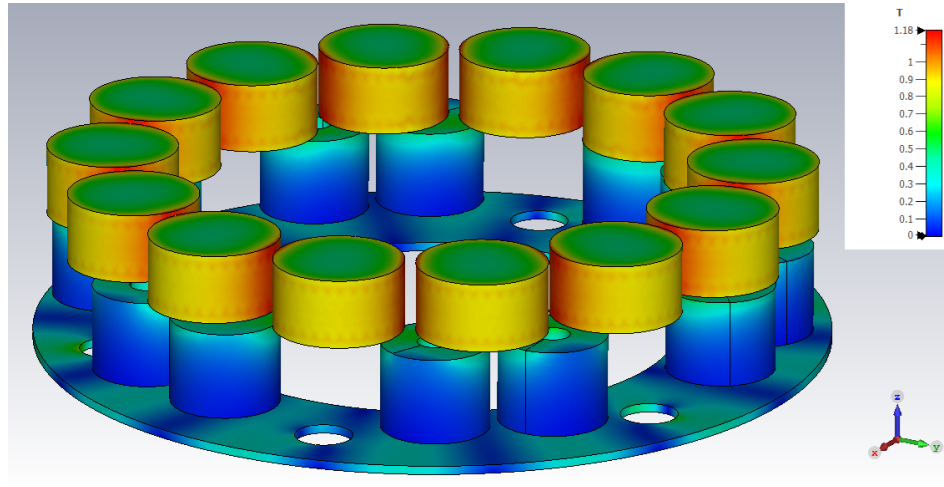


Figura 5.3: Rappresentazione del modulo dell'induzione magnetica

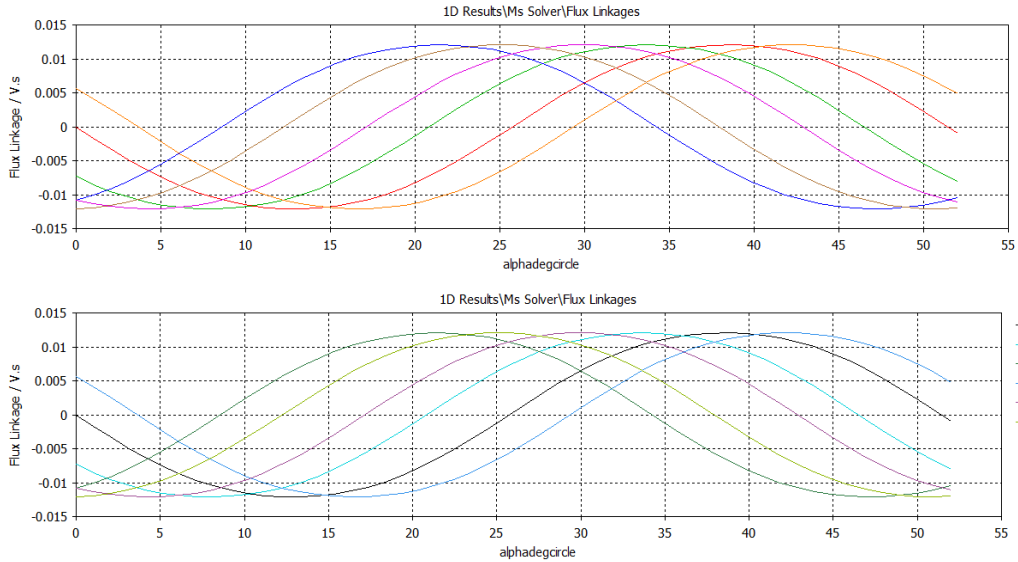


Figura 5.4: Andamento del flusso concatenato da ogni bobina in un periodo

di flusso magnetico nella lamina. Confrontando i flussi concatenati delle bobine 1–6 con quelli delle bobine 7–12, si osserva che il flusso concatenato dalla bobina 1 coincide con quello della bobina 7, il flusso della bobina 2 con quello della bobina 8, e così via per le rimanenti coppie di bobine; ciò è dovuto al fatto che le bobine corrispondenti sono diametralmente opposte sulla circonferenza. *alphadegcircle* è la posizione meccanica del rotore e si fa variare da 0° a 52° utilizzando una *Linear sweep*, ovvero un intervallo di valori equidistanti tra loro. Il periodo in gradi

meccanici τ_m si calcola come:

$$\tau_m = \frac{360^\circ}{p} \quad (5.1)$$

dove p è il numero di paia poli. Nel caso in esame, essendo i paia poli pari a $p = 7$, si ottiene:

$$\tau_m = \frac{360^\circ}{7} \approx 51.43^\circ \quad (5.2)$$

Nella *Linear sweep* di Figura 5.2 si utilizza quindi l'approssimazione $\tau_m \approx 52^\circ$. Attraverso la funzione *Parameter sweep* di CST si è in grado di far variare un qualsiasi parametro, in questo caso si fa variare *alphadegcircle* da 0 a 360 gradi elettrici al fine di visualizzare un periodo completo del flusso concatenato da ciascuna delle 12 bobine.

I valori utilizzati in questa prima configurazione, presenti nella *Parameter List* di CST, sono riportati in Tabella 5.1 e Tabella 5.2 dove sono presenti anche i nomi delle quote dei parametri introdotti nella *Parametrizzazione su CST* nel *Capitolo 4*.

Da notare che la posizione meccanica di rotore *alphadegcircle* corrisponde alla posizione angolare della bobina 1 rispetto all'asse x: variando *alphadegcircle* si fa ruotare la bobina 1 ed essendo le altre bobine e la struttura di rotore costruite a partire dalla numero 1, anch'esse ruotano. Tutte le grandezze non riportate in Tabella 5.1 sono calcolate in funzione di quei parametri di input. Nel software CST, al fine di posizionare il primo foro da cui si ricavano gli altri cinque attraverso *nforimenouno* e *thetaforti*, vengono calcolate le coordinate del suo centro a partire da due dati di input: la distanza radiale *distforolam* e l'angolo *angleforolam*, secondo le relazioni

$$xforolam = distforolam \cdot \cos\left(\text{angleforolam} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.3)$$

$$yforolam = distforolam \cdot \sin\left(\text{angleforolam} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.4)$$

Al fine di creare la bobina 1 indicata in Figura 4.4, occorre definire un *path* e un *profile*: si parte dal *path*, ovvero una circonferenza di raggio *rcircle*, di cui vengono calcolate le coordinate del centro in funzione dei due input distanza radiale *distforolam* e dell'angolo *alphadegcircle*. In particolare:

$$xccircle = distforolam \cdot \cos\left(\text{alphadegcircle} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.5)$$

$$yccircle = distforolam \cdot \sin\left(\text{alphadegcircle} \cdot \frac{\pi}{180}\right) \quad (5.6)$$

Come *profile* si realizza un rettangolo di lato *thr* in senso radiale e di lato *thz* lungo l'asse z con centro (*xccircle*+*rcircle*, *yccircle*). Una volta ottenuta la

Tabella 5.1: Valori parametri di input con corrispondenza ai nomi utilizzati in CST

Parametro	Valore	Unità []	Parametro CST
Lamina			
Raggio interno	28	mm	rilam
Raggio esterno	45.5	mm	relam
Spessore	1	mm	hlam
Distanza foro origine	37.5	mm	distforolam
Raggio del foro	3.3	mm	rforolam
Distanza angolare fori	60	°	thetafori
Distanza angolare foro bobina	19.6	°	angleforolam
Numero fori ridotto di un'unità	5	–	nforimenouno
Bobine			
Numero spire	1250	–	Nbob
Raggio medio	4.125	mm	rcircle
Spessore radiale	4.25	mm	thr
Spessore assiale	10	mm	thz
Distanza angolare coppie bobine	60	°	thetabob
Posizione meccanica rotore	52	°	alphadegcircle
Distanza lamina bobina	2	mm	distlambob
Metà n.° bobine meno uno	5	–	nbobfratto duemenouno
Magneti			
Raggio magnete	7.5	mm	rmagn
Spessore assiale	8	mm	hmagn
Ordinata magnete 1N	36.5	mm	ycmagn
Induzione residua	1.2	T	Bmagn
Numero magneti	14	–	nmagn
Distanza bobina magnete	0.97	mm	gap

Tabella 5.2: Parametri di Mesh e Background

Parametro	Valore	Unità []	Parametro CST
Taglia massima cella mesh	1.5	mm	hsize mesh
Distanza del background	100	mm	dbackground

bobina 1, la si ruota dell'angolo $-(\text{thetafori} - 2 \cdot \text{angleforolam})$, che corrisponde alla distanza angolare tra due bobine adiacenti come si può osservare facilmente da Figura 4.4, in questo modo si ottiene la bobina 2. A questo punto si ottengono per copia le rimanenti dieci bobine, impiegando il comando *rotate* prima sulla bobina 1 e poi sulla bobina 2: l'angolo di rotazione è **thetabob** e il parametro di ripetizione è **nbobfrattoduemenuo**. Le dodici bobine ottenute verranno infine traslate lungo l'asse z di un valore pari a:

$$\frac{\text{thz}}{2} + \text{hlam} + \text{distlambob}$$

Per quanto riguarda il posizionamento dei magneti, nella *Parameter List* viene calcolata la distanza lungo l'asse z tra la lamina e i magneti come:

$$\text{distlammagn} = \text{distlambob} + \text{thz} + \text{gap} \quad (5.7)$$

Sono stati pertanto descritti tutti i parametri appartenenti alla *Parameter List* di questa configurazione.

Al fine di effettuare il confronto, si evidenzia che i materiali utilizzati sono, per il momento, quelli della versione di Cavallo e di Serbu^[4, 5], ovvero la lamina in Mu-Metal lineare e i magneti in NdFeB (magari tabella CST convertita in latex con lista materiali e caratteristiche di ogni materiale). In Tabella 5.3 sono mostrate le proprietà del materiale della lamina.

Tabella 5.3: Proprietà del materiale Mu-Metal

Simbolo	Proprietà	Valore	Unità []
ε_r	Permittività relativa	1	–
σ	Conducibilità elettrica	1.43×10^{-6}	S/m
μ_r	Permeabilità relativa	80000	–
ρ	Densità	8740	kg/m ³
E	Modulo di Young	207	kN/mm ²
ν	Coefficiente di Poisson	0.3	–
α	Coefficiente di dilatazione termica	13×10^{-6}	1/K

Il materiale Nickel-Steel Mu-Metal è stato aggiunto nella libreria di CST in *Load from Material Library* ed è stato applicato alla lamina. È importante osservare che questo materiale ha una caratteristica magnetica $B(H)$ di tipo lineare, descritta dalla relazione

$$B = \mu H \quad (5.8)$$

dove μ rappresenta la permeabilità magnetica del materiale. Inoltre, presenta una permeabilità relativa molto alta rispetto agli altri materiali ferromagnetici

($\mu_r = 80000$) al fine di avere un flusso magnetico maggiore che si richiude nella lamina e quindi un valore più elevato di tensione totale dal momento che non sono presenti le viti in questa configurazione.

Il materiale utilizzato per le bobine è il rame, equivalente all'aria dal punto di vista magnetico. Infine, per i magneti è stato impiegato il materiale N50 (sintered NdFeB) di cui si possono osservare le caratteristiche in Tabella 5.4.

Tabella 5.4: Proprietà del materiale N50 (sintered NdFeB)

Simbolo	Proprietà	Valore	Unità []
ε_r	Permittività relativa	1	–
σ	Conducibilità elettrica	6.7×10^5	S/m
μ_r	Permeabilità relativa	1.05	–
ρ	Densità	7400	kg/m ³

I magneti al neodimio sono costituiti da una lega di neodimio, ferro e boro (NdFeB). Si tratta di una lega con elevate proprietà magnetiche, di colore bianco-argenteo, caratterizzata da fragilità meccanica e facilmente lesionabile. I magneti commerciali vengono classificati in diversi gradi, contraddistinti da un codice che inizia con la lettera “N” (Neodymium) seguita da un numero, ad esempio N27, N35, N42 o N50. Tale valore identifica il prodotto di energia massimo del magnete, cioè la sua capacità di immagazzinare energia magnetica. Si ricorda che due magneti adiacenti presentano polarità opposte, come mostrato in Figura 5.5 ($p = 7$), inoltre ogni magnete ha un'induzione residua di 1.2 T, come già visto in Tabella 5.1.

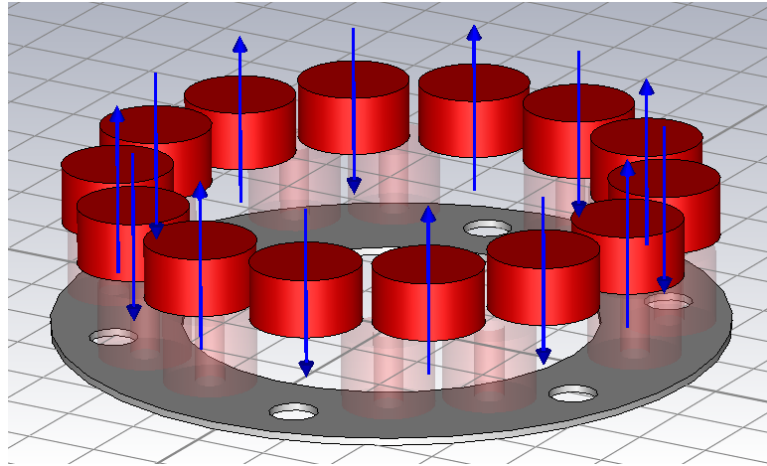


Figura 5.5: Configurazione e polarità dei magneti

La mesh utilizzata per ogni simulazione è costituita da celle tetraedriche, in Figura 5.6 si può osservare la mesh impiegata per tutte le configurazioni dell'Harvey. Nella Parameter List di CST è stato definito il parametro `hsizemesh` = 1.5 mm (Tabella 5.2), utilizzato in ogni configurazione, che corrisponde alla dimensione massima della cella della griglia di discretizzazione. In questo modo è possibile controllare in maniera univoca la precisione della mesh: valori più piccoli del parametro comportano una discretizzazione più fine e quindi una maggiore accuratezza della simulazione, a fronte di un tempo di calcolo più elevato.

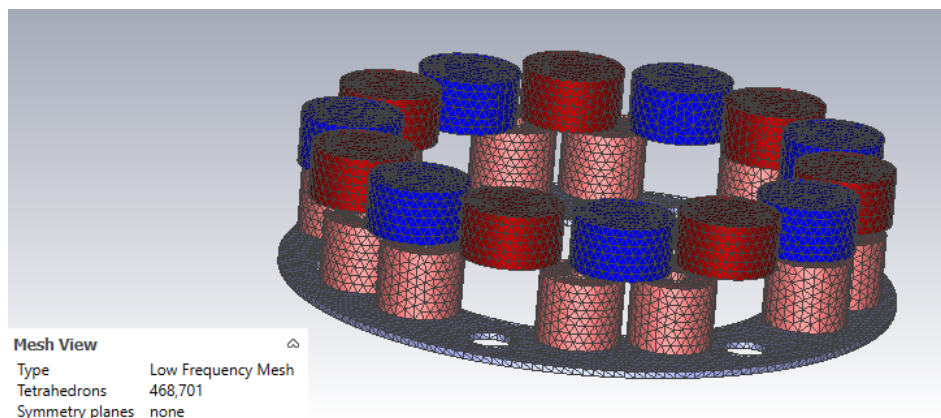


Figura 5.6: Mesh della configurazione 3

Il parametro `dbackground` = 100 mm (Tabella 5.2), utilizzato in ogni simulazione, definito nella Parameter List e richiamato nelle impostazioni del *Background*, stabilisce la distanza tra la geometria del modello e i confini del dominio di simulazione. Con l'opzione "*Apply in all directions*", tale distanza viene applicata uniformemente in tutte le direzioni, come si può vedere da Figura 5.7. La scelta di questo valore influisce sul compromesso tra accuratezza della simulazione (riduzione degli effetti dei contorni) e complessità computazionale (numero di celle della mesh). Tali confini coincidono con le condizioni al contorno (*Boundary Conditions*), applicate al termine del background. La scelta di un valore adeguato è fondamentale: un background troppo ridotto può alterare l'andamento delle linee di flusso e quindi i risultati delle induzioni magnetiche, mentre un background sufficientemente ampio garantisce che i campi si sviluppino correttamente senza interferenze artificiali.

In tutte le simulazioni, a partire da questa, si ricorda che sul software CST viene impostata la configurazione ottimale di polarità delle bobine, già introdotta

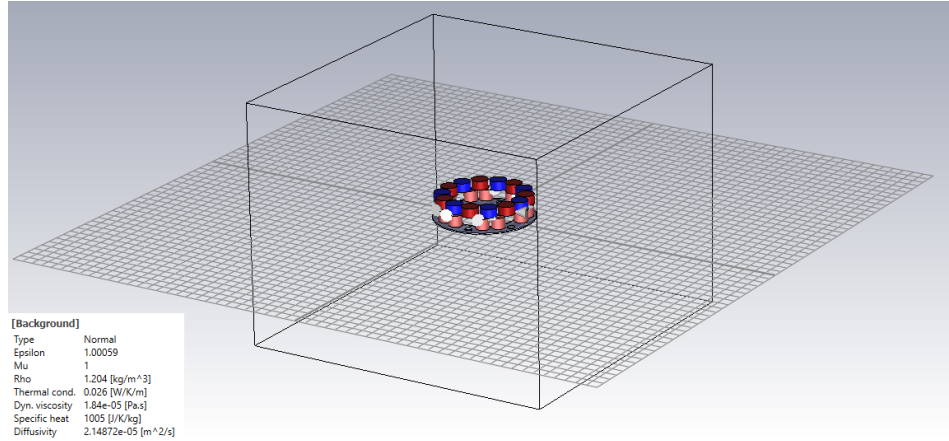


Figura 5.7: Background della configurazione 3

e validata nei precedenti lavori di tesi^[4, 5], definita come

$$\chi = (+1, -1, -1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, +1, +1, -1) \quad (5.9)$$

corrispondente a quella illustrata in Figura 5.8, al fine di ottenere la massima tensione ai capi della serie delle 12 bobine. Nel vettore, la posizione dell'elemento corrisponde al numero della bobina. La configurazione ottimale di polarità è stata ottenuta dalla ricerca per enumerazione tra l'insieme delle possibili configurazioni che sono pari a

$$2^{N_{coils}} = 2^{12} = 4096 \quad (5.10)$$

e possono essere dimezzate considerando che le configurazioni di polarità simmetriche forniscono come risultato lo stesso valore assoluto di flusso.

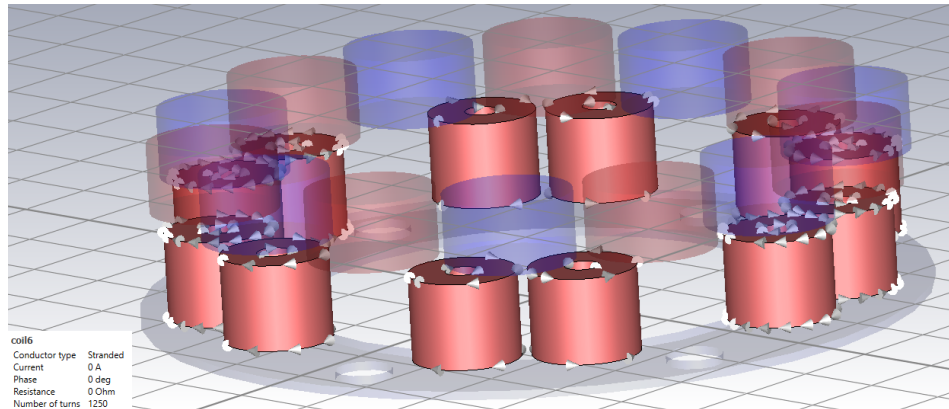


Figura 5.8: Configurazione ottimale di polarità delle 12 bobine

Configurazione “*Harvey_Final_4_Mana*”

In questa configurazione, come mostrato in Figura 5.9, sono state aggiunte 12 viti in corrispondenza delle bobine che, per il momento, vengono ancora configurate col materiale *Air* al fine di verificare che si ottengano gli stessi risultati della configurazione “*Harvey_Final_3_Mana*” della Configurazione 3.

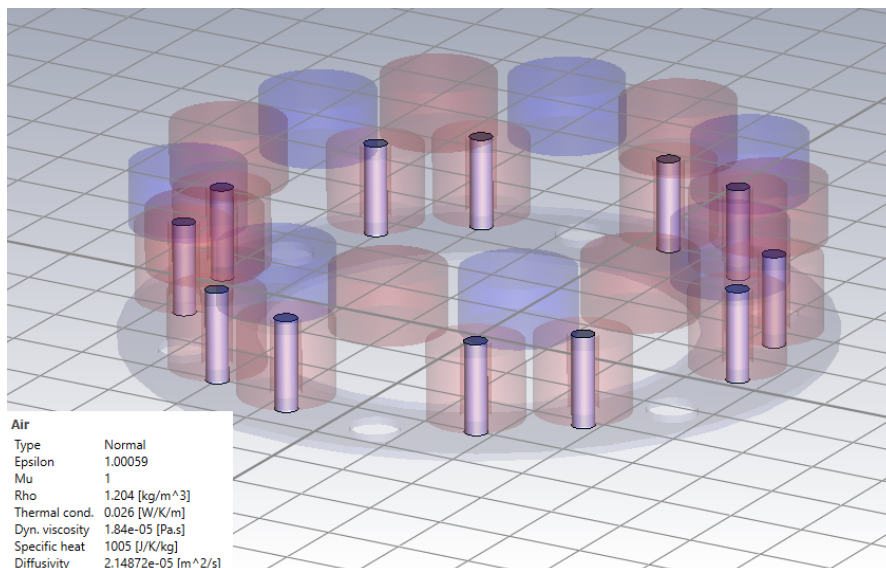


Figura 5.9: Modello geometrico con viti inserite e definite in materiale aria

La Tabella 5.5 riassume i parametri di input della vite presenti nella *Parameter List* di CST.

Tabella 5.5: Parametri di controllo delle viti

Parametro	Valore	Unità []	Parametro CST
Raggio vite	1.5	mm	rvite
Controllo gap effettivo	0	–	percentgap

Nella *Parameter List* vengono calcolati altri due parametri in funzione dei dati di input: la lunghezza della vite **lvite** e il gap effettivo **realgap** già introdotti in Figura 4.5. La lunghezza della vite viene calcolata come:

$$lvite = distlambob + thz + percentgap \cdot gap \quad (5.11)$$

Agendo sul parametro di input **percentgap** è pertanto possibile variare la lunghezza delle dodici viti e il gap effettivo per quella simulazione: con un **percentgap** > 0

si hanno viti che superano le bobine e si avvicinano ai magneti più il parametro aumenta, al contrario se `percentgap` è negativo e viene fatto diminuire. In Figura 5.10 si osserva la vista in sezione frontale che rende visibili i dettagli geometrici delle viti: si nota che è impostato

$$\text{percentgap} = 0 \quad (5.12)$$

in modo che in tutte le configurazioni fino alla numero 16 (Section 5) si abbia

$$\text{lvite} = \text{distlambob} + \text{thz} = 12 \text{ mm} \quad (5.13)$$

ovvero che il gap effettivo (distanza tra le viti e i magneti), definito come

$$\text{realgap} = \text{gap} \cdot (1 - \text{percentgap}) \quad (5.14)$$

sia pari a

$$\text{realgap} = \text{gap} = 0.97 \text{ mm} \quad (5.15)$$

che, come definito precedentemente in Tabella 5.1, è la distanza tra le bobine e i magneti.

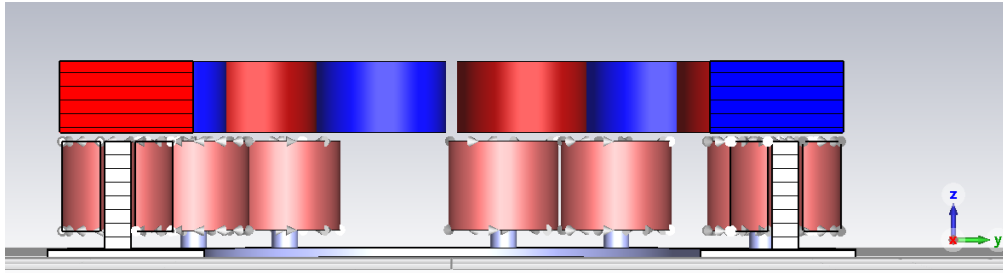


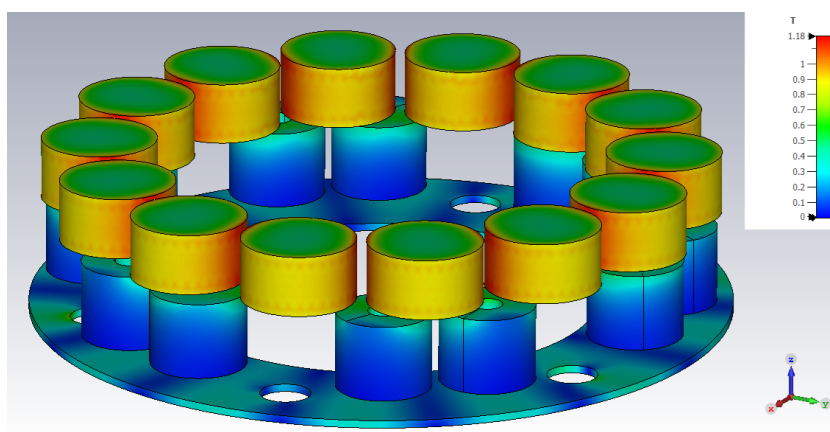
Figura 5.10: Vista in sezione frontale della configurazione 4

Avendo impostato come materiale delle viti l'aria, dall'esecuzione della simulazione si verifica che i valori del modulo di induzione e di flusso concatenato sono gli stessi di *“Harvey_Final_3_Mana”*, come mostrato in Figura 5.11.

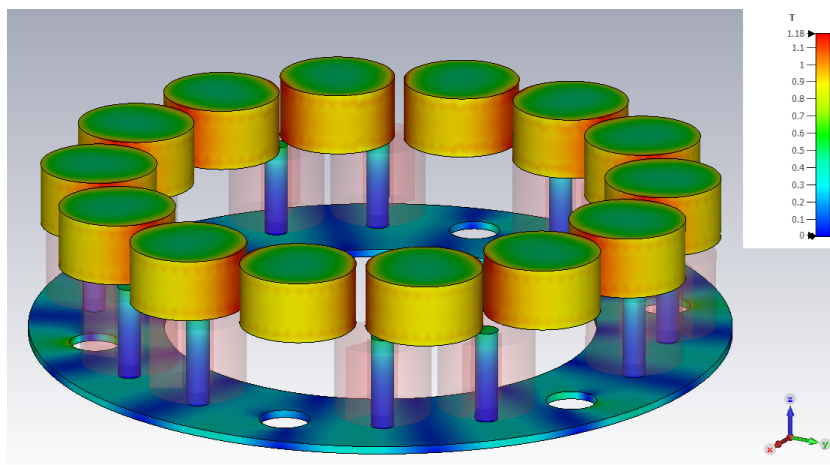
Configurazione *“Harvey_Final_5_Mana”*

In questo progetto CST si hanno le 12 viti dello stesso materiale della lamina della configurazione 3, ovvero in Mu-Metal lineare, come si nota da Figura 5.12.

L'aggiunta di viti in materiale ferromagnetico ha l'obiettivo finale di aumentare l'induzione magnetica, quindi il flusso concatenato dalle bobine e di conseguenza la tensione di picco totale ai capi dell'avvolgimento. In questo modo si superano



(a)



(b)

Figura 5.11: Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 3 (a) e 4 (b)

sostanzialmente i valori minimi di tensione di alimentazione necessaria al funzionamento della scheda a circuito stampato (PCB) e del trasmettitore Bluetooth senza dover modificare la struttura del PCB.

Eseguendo la simulazione, accade quanto ci si aspettava: si ha un incremento dell'induzione magnetica da un valore massimo pari a $B = 1.18 \text{ T}$ della configurazione 3 e 4 (assenza di viti) a uno di $B = 8.3 \text{ T}$, come si nota da Figura 5.13.

Allo stesso modo, il valore di picco del flusso concatenato da ciascuna bobina aumenta approssimativamente di un fattore pari a 4, come si evince dal confronto di Figura 5.14.

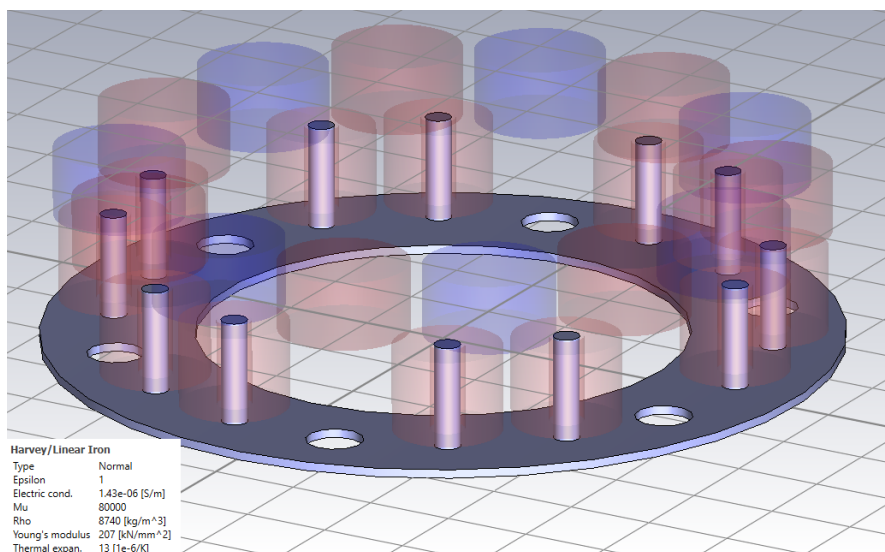
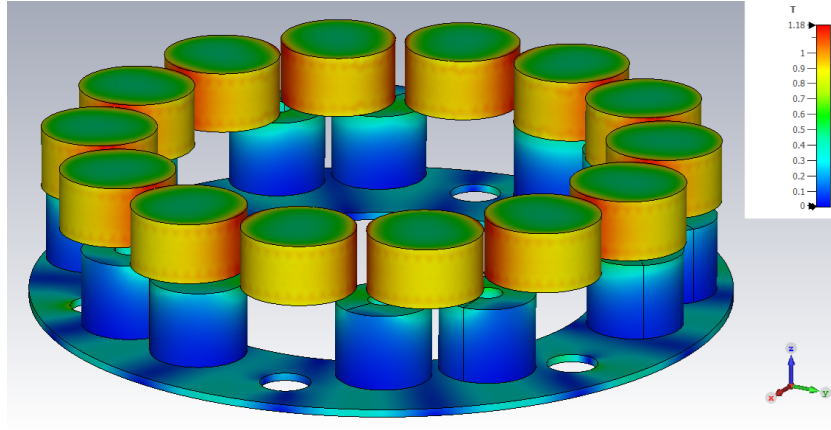


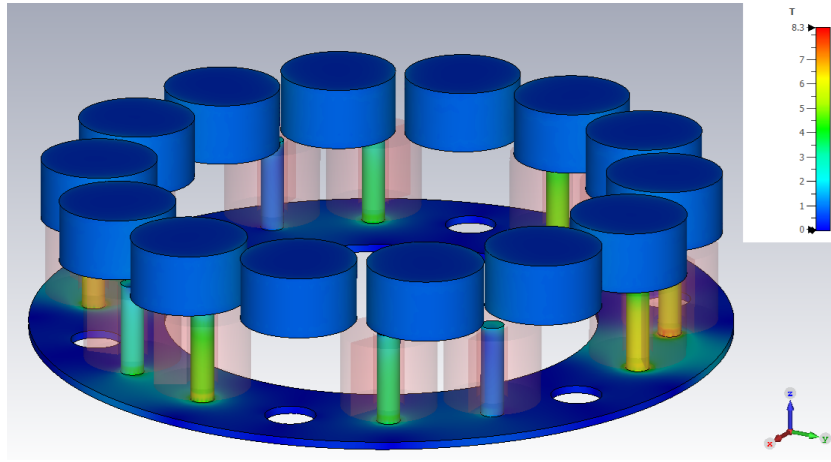
Figura 5.12: Modello con lamina e viti definite in Mu-Metal

Finora il materiale Mu-Metal è stato modellato come lineare; tuttavia, l'aggiunta delle viti introduce la possibilità che esse siano soggette a saturazione magnetica, da Figura 5.13 emerge una forte saturazione del Mu-Metal: le linee di campo si concentrano nelle viti con il modulo dell'induzione magnetica che risulta significativamente superiore all'induzione residua dei magneti, pari a 1.2 T. Di conseguenza, i fattori approssimativi ricavati dal confronto non risultano realistici. Per tale motivo, nella configurazione 9 il materiale verrà modellato considerando la sua natura non lineare, al fine di valutare in modo più accurato gli effetti di saturazione.

Come già accennato, le viti in materiale ferromagnetico vengono aggiunte al fine di ridurre il traferro **realgap** e aumentare il flusso magnetico concatenato dalle bobine, in questo modo ci si aspetta che la potenza generata e la tensione indotta nelle bobine aumenti risolvendo il problema di scarsa generazione riportato nelle *Conclusioni* della tesi di Cavallo^[4]. Come rovescio della medaglia si prevede un aumento delle coppie di riluttanza esercitate sui magneti a statore rispetto al caso senza viti. L'incremento di coppia potrebbe portare alla rotazione indesiderata dello statore. Dato che il flusso aumenta notevolmente rispetto al caso precedente, non si ha più la necessità di utilizzare il materiale Mu-Metal, ma si può ricorrere al ferro, soluzione adottata dalla simulazione 6 in avanti: è lecito attendersi un aumento più contenuto del flusso concatenato comunque sufficiente ad alimentare il PCB, e una diminuzione di coppia agente sui magneti. Un ulteriore parametro che si può variare al fine di eliminare la rotazione indesiderata dello statore è la distanza



(a)



(b)

Figura 5.13: Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 3 (a) e 5 (b)

tra le bobine e i magneti **gap** introdotta nella Tabella 5.1. Infatti, successivamente verranno eseguite delle simulazioni con

$$\text{gap} = 1 \text{ mm}, \quad \text{gap} = 1.5 \text{ mm}, \quad \text{gap} = 2 \text{ mm}$$

al fine di valutare la riduzione del flusso e della coppia agente sui magneti all'aumentare del **gap**: si rimanda alle simulazioni da Section 5 in poi e al [Capitolo 6](#) relativo all'elaborazione dei risultati ottenuti dal software CST. Verrà infine svolta una prova meccanica al [Capitolo 9](#) dove finalmente la macchina avrà le bobine, la lamina e le viti in rotazione e verrà verificato che lo statore non oscilli. Un'ultima

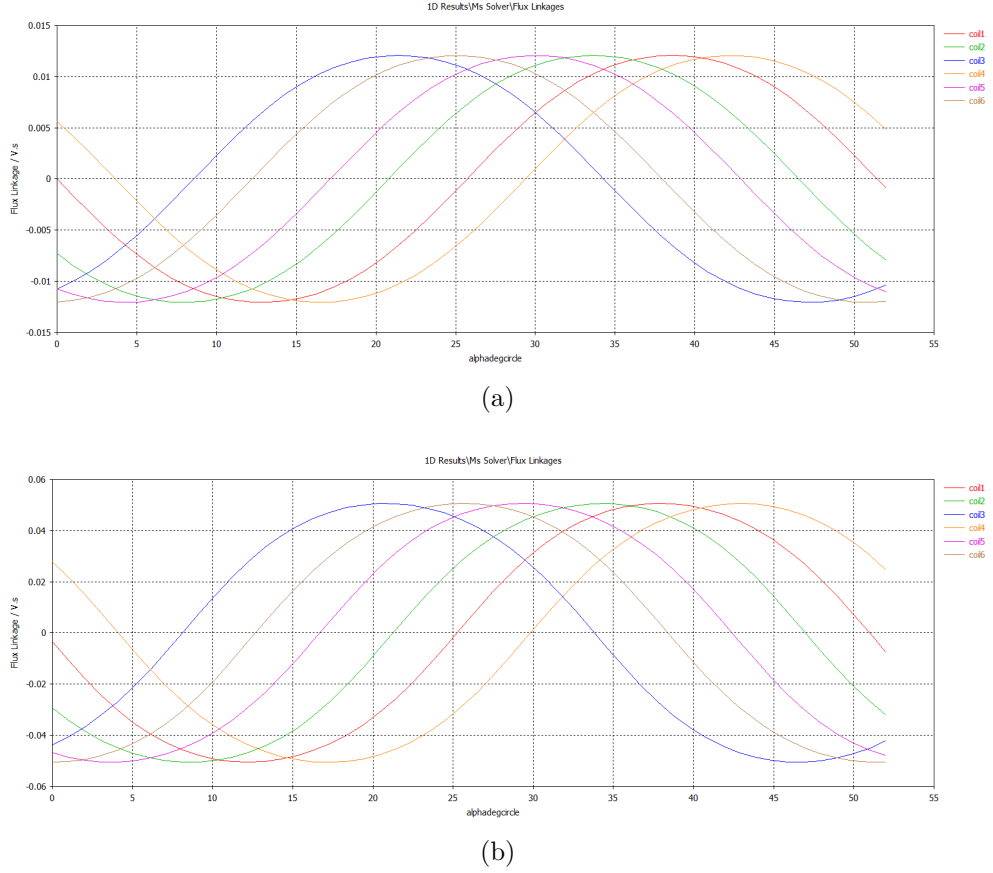


Figura 5.14: Confronto del flusso concatenato 1D (bobine 1-6) tra la configurazione 3 (a) e 5 (b)

possibilità è agire direttamente su `percentgap` al fine di modificare simultaneamente `lvite` e il traferro `realgap`: verranno svolte ulteriori prove meccaniche con valori di `percentgap` diversi da zero in continuità con gli studi CST svolti nella configurazione “*Harvey_Final_17_Mana*”.

Configurazione “*Harvey_Final_6_Mana*”

In questa simulazione viene utilizzato il modello “*Harvey_Final_5_Mana*” in cui il materiale della lamina e delle viti, originariamente definito come Mu-Metal, è sostituito con un ferro a comportamento lineare. Di seguito, in Tabella 5.6, sono riportati i valori assegnati al materiale ferro definito nella libreria dei materiali (*Modeling* → *Material Library*).

La modifica di maggior rilievo riguarda la permeabilità relativa, che viene ridotta dal valore precedente di $\mu_r = 80000$ a $\mu_r = 1000$. In questa fase vengono

Tabella 5.6: Proprietà del materiale Ferro

Simbolo	Proprietà	Valore	Unità []
ε_r	Permittività relativa	1	—
σ	Conducibilità elettrica	1.04×10^7	S/m
μ_r	Permeabilità relativa	1000	—
ρ	Densità	7870	kg/m ³
E	Modulo di Young	200	kN/mm ²
ν	Coefficiente di Poisson	0.291	—
α	Coefficiente di dilatazione termica	12×10^{-6}	1/K

modificati esclusivamente i materiali, mantenendo invariati i valori dei parametri e senza introdurre la caratteristica magnetica $B(H)$. La non linearità verrà infatti analizzata nelle simulazioni successive (dalla configurazione 9 in poi) con lo scopo di visualizzare un effetto alla volta.

Si effettua un confronto tra i risultati di “*Harvey_Final_6_Mana*” e di “*Harvey_Final_5_Mana*”. Si registra una diminuzione dell’induzione magnetica da un valore massimo pari a $B = 8.3$ T della configurazione 5 (Mu-Metal: Figura 5.13) a uno di $B = 7.38$ T, come si nota da Figura 5.15. Nonostante ciò, si osserva ancora una forte saturazione del ferro in corrispondenza delle viti che rende necessaria l’introduzione della non linearità nel materiale.

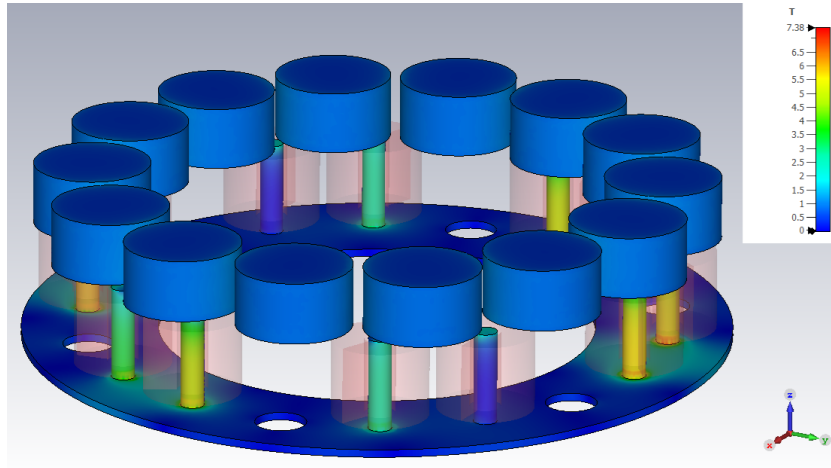


Figura 5.15: Modulo di induzione magnetica della configurazione 6

Analogamente, si verifica una lieve diminuzione (circa 4.1%) del valore di picco del flusso concatenato da ciascuna bobina, come si evince dal confronto di Figura 5.14

(Mu-Metal) con Figura 5.16 (Ferro).

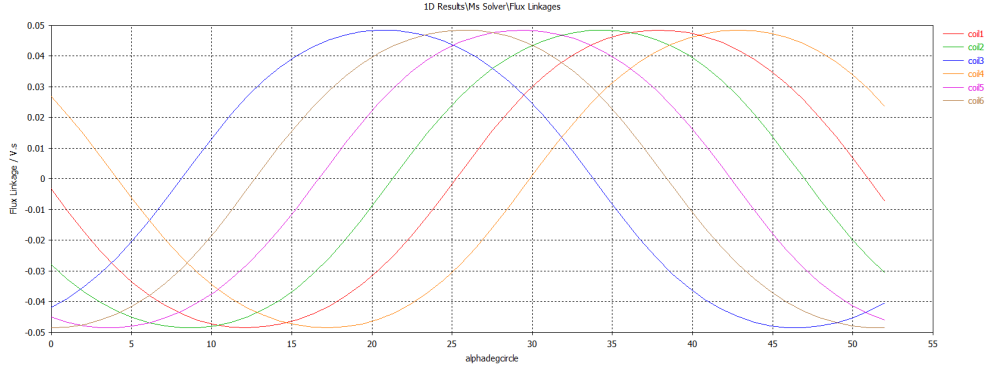


Figura 5.16: Andamento di flusso concatenato (bobine 1-6) della configurazione 6

Configurazione “*Harvey_Final_7_Mana*”

In questa analisi si parte dalla configurazione “*Harvey_Final_4_Mana*” e viene effettuata una variazione della conducibilità elettrica della lamina, passando dal valore $\sigma = 1.43 \times 10^{-6} \text{ S/m}$ a $\sigma = 1.7 \times 10^6 \text{ S/m}$: si osserva che il valore di conducibilità elettrica non influisce in alcun modo sui valori di flusso concatenato dalle bobine e di induzione magnetica. I risultati ottenuti coincidono con quelli di Figura 5.11 e di Figura 5.4.

Configurazione “*Harvey_Final_8_Mana*”

Questa configurazione è assimilabile ad “*Harvey_Final_4_Mana*”, ovvero con le viti definite in materiale aria, con la differenza che il materiale della lamina è il ferro a comportamento lineare di Tabella 5.6 anziché il Mu-Metal.

A differenza della configurazione 6, qui non si può avere saturazione, perchè non ho viti in materiale ferromagnetico. Nelle due configurazioni 4 e 8, in cui non si ha il fenomeno di saturazione (assenza di viti), la differenza di permeabilità tra Mu-Metal e Ferro influisce poco, in particolare si ha lo stesso valore massimo di induzione di Figura 5.11, pari a 1.18 T e una diminuzione trascurabile del flusso concatenato (Figura 5.4) al diminuire della permeabilità, come mostrato in Figura 5.17 e in Figura 5.18.

Per questo motivo, confrontando con “*Harvey_Final_6_Mana*” questa configurazione (materiale Ferro con comportamento lineare), si ottiene all’incirca lo stesso fattore di flusso che si ha tra la configurazione 4 e 5 (materiale Mu-Metal con comportamento lineare), pari a 4.022.

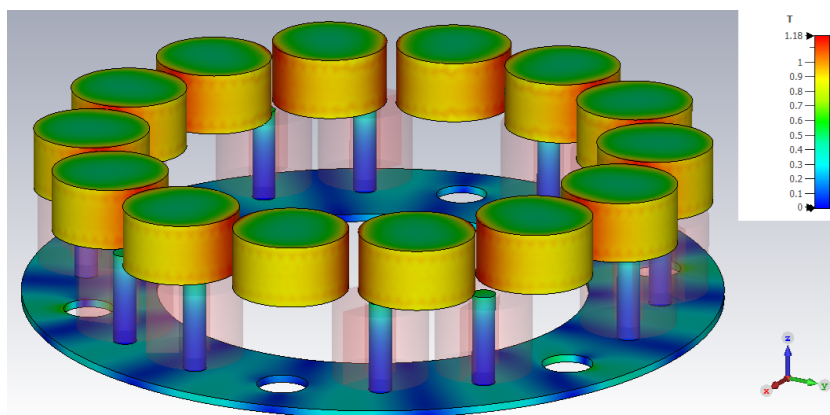


Figura 5.17: Modulo di induzione magnetica della configurazione 8

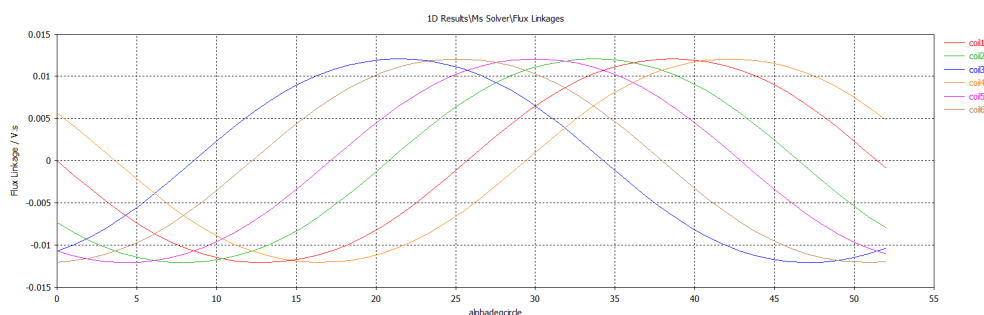


Figura 5.18: Andamento di flusso concatenato (bobine 1-6) della configurazione 8

Configurazione “*Harvey_Final_9_Mana*”

In questa configurazione si parte utilizzando “*Harvey_Final_6_Mana*” con la modifica al materiale delle viti e della lamina che anzichè essere ferro a comportamento lineare ($\mu_r = 1000$) ora è ferro con una caratteristica $B(H)$ *non lineare*, come si può vedere da Figura 5.19.

La curva viene introdotta da *Modeling* → *Material Library* ed è non lineare con *mu type* Isotropic. Sul software CST è possibile visualizzare e confrontare le caratteristiche magnetiche $B(H)$ e delle permeabilità $\mu(H)$ (Figura 5.20 e 5.21): con l'introduzione della non linearità compare il percorso *1D Results* → *Materials* → *Harvey* → *Iron* → *Non lin* → *Tutti i grafici*.

L'utilizzo del materiale *non lineare* comporta un aumento sostanziale del tempo di calcolo per ogni valore di `alphadegcircle` rispetto al caso *lineare*: viene impiegato il risolutore non lineare per la soluzione del problema magnetostatico. Con l'aggiunta delle viti si è obbligati ad effettuare questa modifica rispetto alla versione di Cavallo in modo da ottenere risultati coerenti.

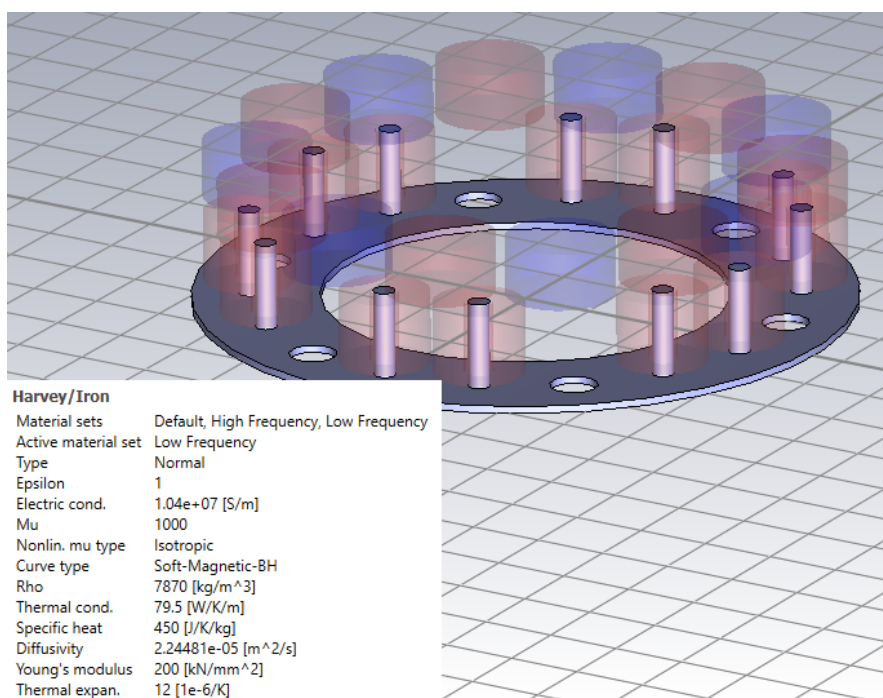


Figura 5.19: Introduzione della non linearità su viti e lamina

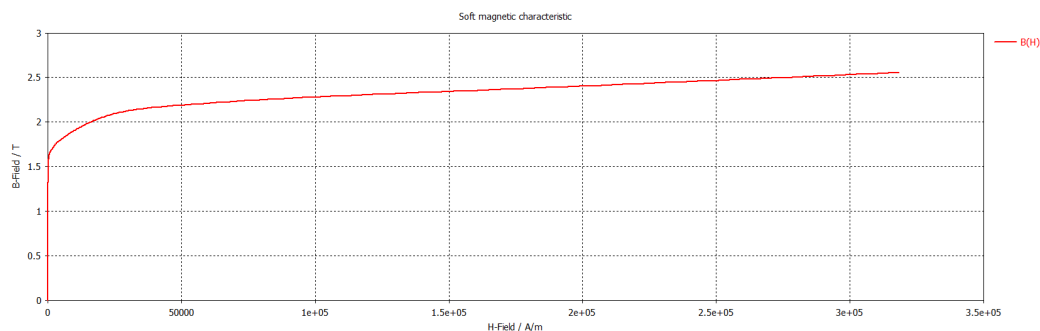


Figura 5.20: Caratteristica magnetica $B(H)$

A questo punto, come si può notare dalle due Figure 5.22 e 5.23, si effettua un confronto con “*Harvey_Final_6_Mana*” sia a livello di valori di moduli di induzione che di flussi concatenati da ciascuna bobina.

Ora, essendo rappresentata la saturazione, si osserva che i valori di flusso concatenato non quadruplicano più rispetto al caso 8 (Figura 5.18) e anche i valori di induzione nelle viti sono inferiori (modulo massimo da 7.38 T a 2.54 T), si ottiene quindi una rappresentazione più vicina alla realtà con l'introduzione della non

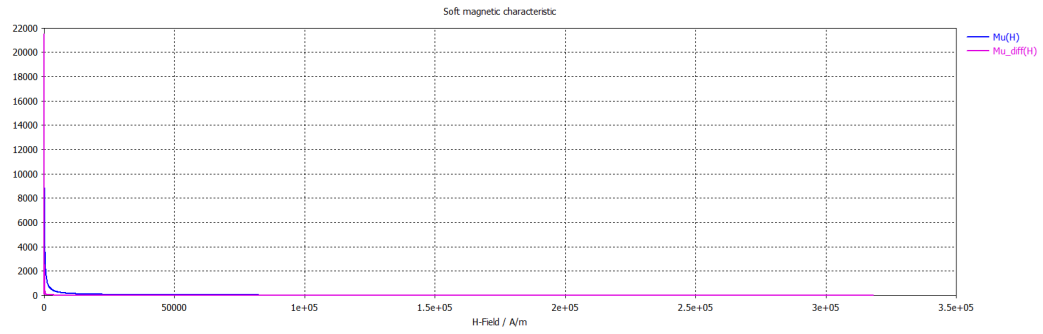
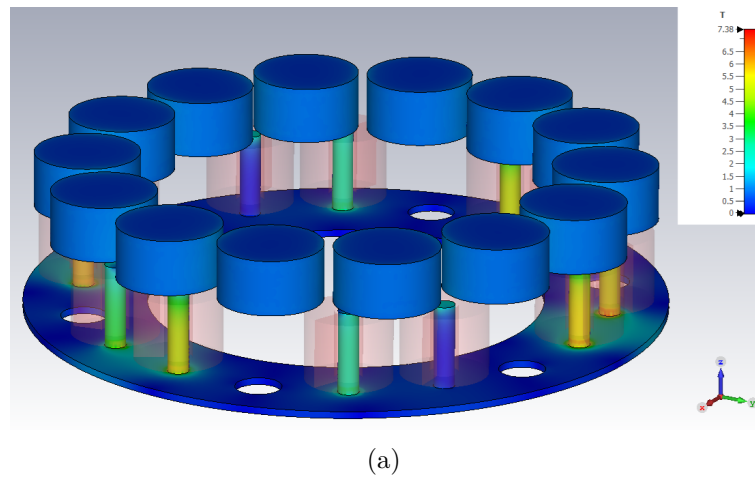
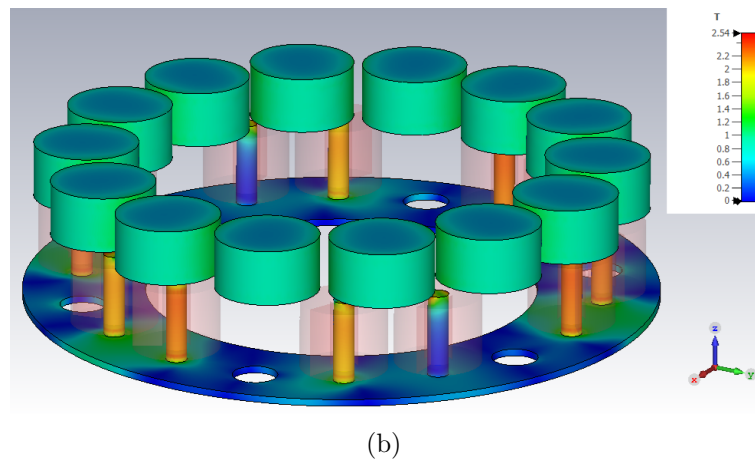


Figura 5.21: Confronto tra le curve di permeabilità



(a)



(b)

Figura 5.22: Confronto del modulo di induzione magnetica 3D tra la configurazione 6 (a) e 9 (b)

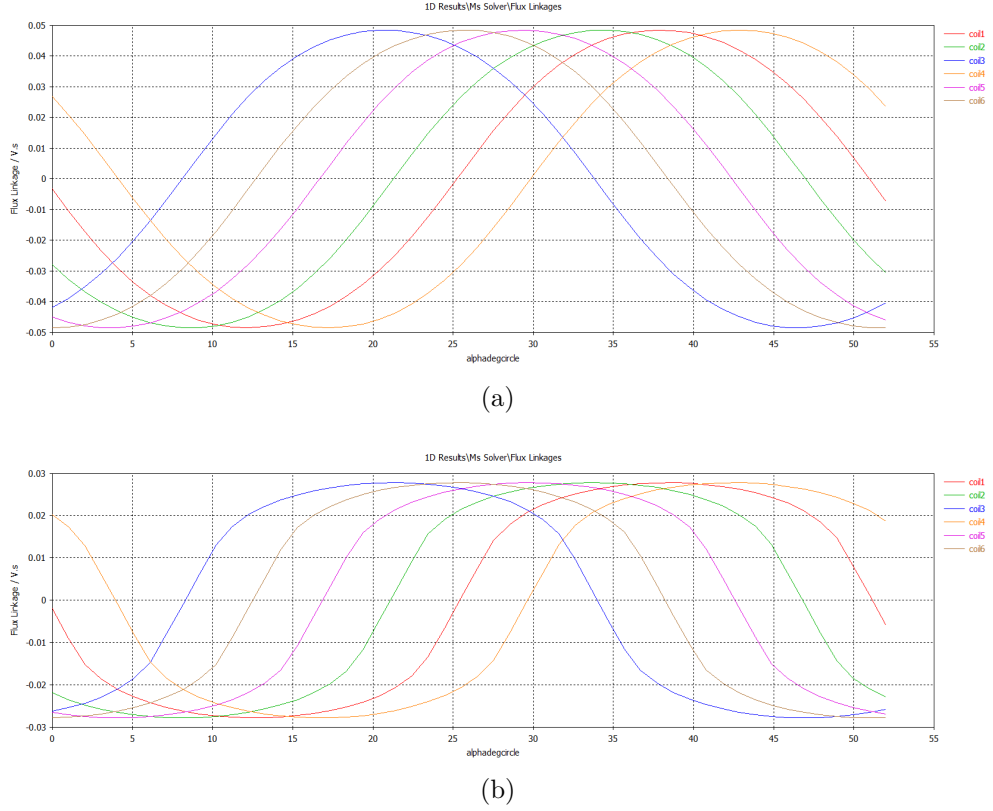


Figura 5.23: Confronto del flusso concatenato 1D (bobine 1-6) tra la configurazione 6 (a) e 9 (b)

linearità.

In particolare, si ha che i valori di picco dei flussi sono circa 2.3 volte rispetto al caso precedente senza viti. In conclusione, il flusso non quadruplica come visto precedentemente, ma aumenta comunque sostanzialmente rispetto al caso senza viti, quindi, al fine di eliminare la rotazione indesiderata dello statore si può ancora pensare all'aumento del parametro **gap** introdotto nel capitolo precedente in Figura 4.5 o alternatively, di agire su **percentgap** al fine di modificare **lvite** e il traferro **realgap** simultaneamente. Nel **Capitolo 6** si elaboreranno i flussi e le coppie in modo da ottenere la tensione ai capi dell'avvolgimento costituito dalle dodici bobine in serie e la coppia totale agente sullo statore per tre differenti valori di **gap** e per diversi valori di **percentgap**.

In Figura 5.24 è possibile visualizzare l'andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 dove si osserva che, con l'introduzione della *non linearità* e la saturazione

delle dodici viti, la forma d'onda del flusso concatenato è meno sinusoidale rispetto alle configurazioni precedenti.

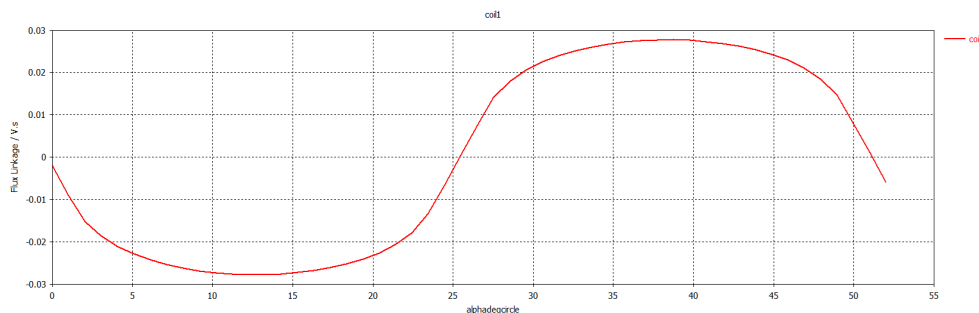


Figura 5.24: Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1

Configurazione “*Harvey_Final_10_Mana*”

Le simulazioni 10 e 11 sono dedicate alla variazione delle condizioni al contorno (*Simulation* $\rightarrow$ *Boundaries*) al fine di verificare la differenza tra le diverse impostazioni del software CST. In questa configurazione si utilizza “*Harvey_Final_9_Mana*” con *Boundaries* impostati come $E_t = 0$ (“electric, $E_t = 0$ ”) come si può vedere dalla Figura 5.25.

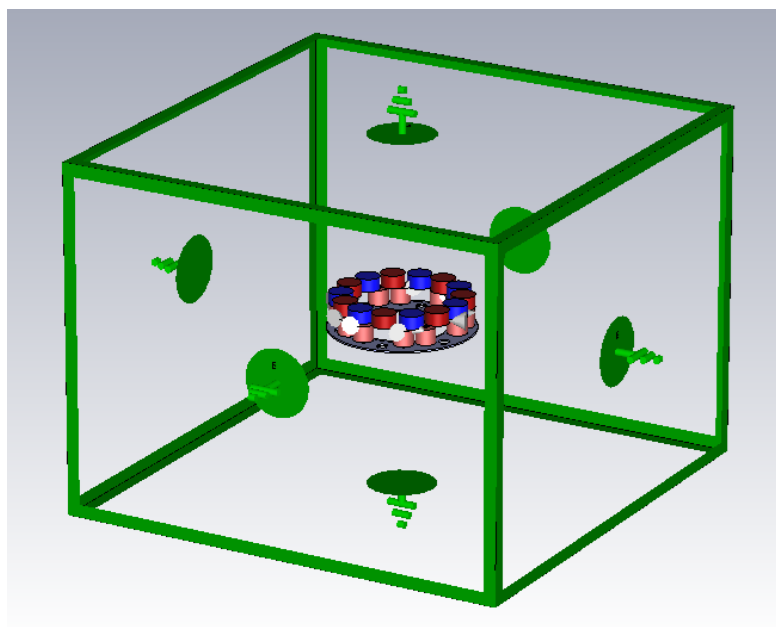


Figura 5.25: Condizioni al contorno “electric, $E_t = 0$ ”

In tutte le simulazioni viste finora sono state impostate queste condizioni al contorno.

Configurazione “*Harvey_Final_11_Mana*”

In questa simulazione si utilizza “*Harvey_Final_9_Mana*” con *Boundaries* $H_t = 0$ (“magnetic, $H_t = 0$ ”) invece di $E_t = 0$, come si può notare da Figura 5.26.

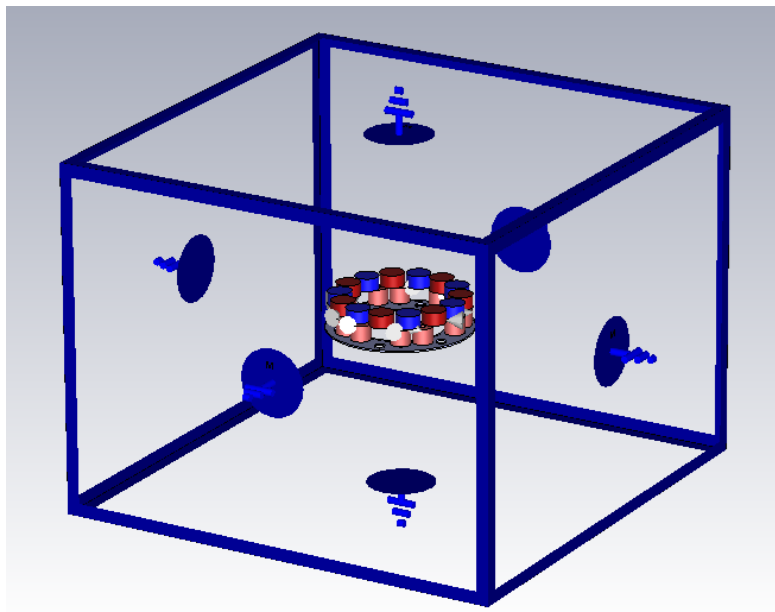


Figura 5.26: Condizioni al contorno “magnetic, $H_t = 0$ ”

Confrontando con la configurazione 9 (o 10), si osserva che varia la quinta cifra significativa dei flussi concatenati da ogni bobina. Pertanto, le due condizioni al contorno possono essere considerate equivalenti e restano validi gli andamenti e i valori di flusso concatenato e induzione mostrati nel Paragrafo 5.7. D’ora in poi verrà impiegato questo come modello base per le successive configurazioni, ovvero le condizioni al contorno saranno sempre di tipo “magnetic”.

Configurazione “*Harvey_Final_12_Mana*”

Rispetto all’analisi svolta da Cavallo^[4] e Serbu^[5], si desidera aggiungere la valutazione delle coppie agenti sui magneti, per far ciò si va in *Simulation* → *Par. Sweep*, a questo punto sulla finestra che si apre si clicca su *Result Templates*, nella sezione dove compare “*2D and 3D Field Results*” si va a modificare selezionando “*Statics and Low Frequency*”, a questo punto nella tendina inferiore si può impostare “*Calculate Force and Torque*” e come object si selezionano uno a uno i componenti

interessati, ovvero i 14 magneti, andando a cliccare “Torque around z/w -axis” e “Force - abs”. In questo modo si ottiene la coppia e la forza applicata sui magneti al variare del parametro impostato in *Par. Sweep*, in questo caso `alphadegcircle`: posizione meccanica del rotore.

In questa simulazione si utilizza come modello base “*Harvey_Final_11_Mana*” con l’aggiunta delle coppie agenti su ciascuno dei 14 magneti e per completezza del modulo delle forze (abs). Come in tutte le configurazioni analizzate finora, si ricorda che i valori dei parametri utilizzati sono gli stessi di Tabella 5.1, 5.2 e 5.5.

Di seguito, si riporta la Figura 5.27 che mostra dove sono collocate le coppie e le forze sul software CST: per visualizzare i grafici relativi occorre navigare nella tendina a sinistra (*Navigation Tree*) e scorrere in basso nella sezione *Tables* → *0D Results*.

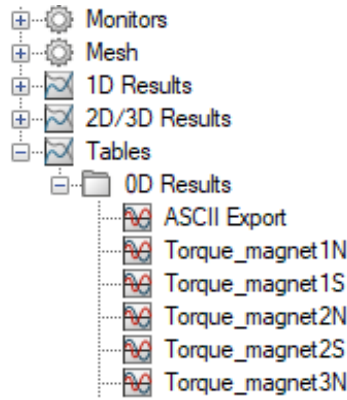


Figura 5.27: Collocazione CST dei grafici di coppia agente sui magneti

Questa è la versione completa. Tuttavia, avendo simulato i flussi per un intervallo di `alphadegcircle` che ha come valore massimo 52° , la coppia agente sul singolo magnete non risulterà illustrata per tutto il suo periodo, come mostrato in Figura 5.28 per il magnete 1N. Si ricorda che per i magneti viene impiegata la numerazione definita in Figura 4.3 e si rimanda al Paragrafo 5.14 dove viene introdotto e motivato il valore del periodo della coppia estendendo l’intervallo di `alphadegcircle` per cui viene effettuata la simulazione.

Si osservino in Figura 5.29 gli andamenti della coppia agente su otto dei quattordici magneti, in funzione della posizione meccanica di rotore.

Confrontando la coppia agente sui primi quattro magneti (da 1N a 2S) con la coppia dei magneti da 4S a 6N, si osserva che la coppia agente sul magnete 1N coincide con quella del magnete 4S, la coppia sul magnete 1S con quella sul magnete 5N, e così via per le rimanenti coppie di magneti; ciò è dovuto al fatto che i magneti corrispondenti sono diametralmente opposti sulla circonferenza. I grafici

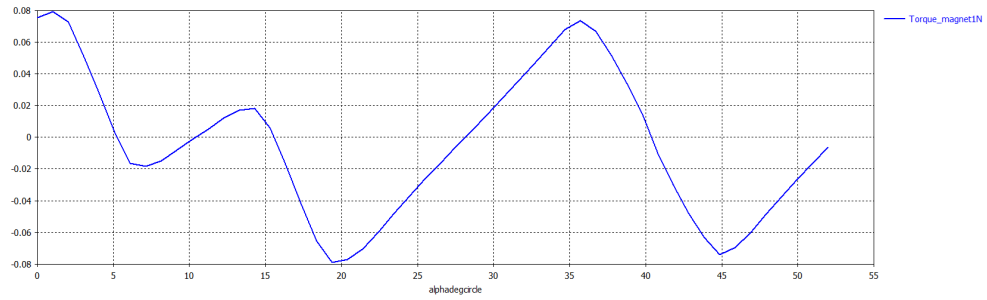
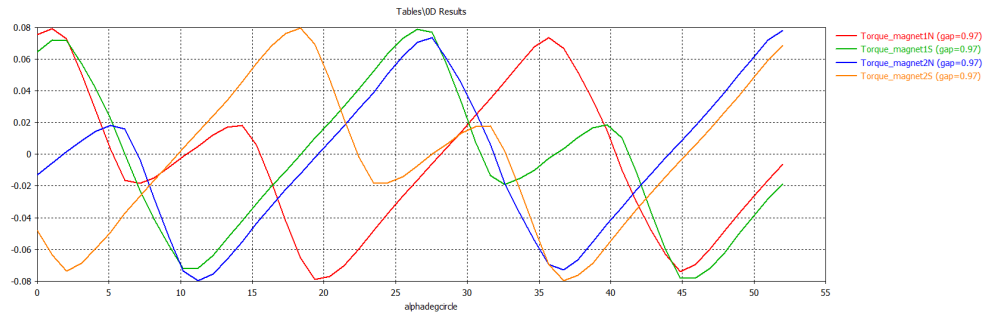
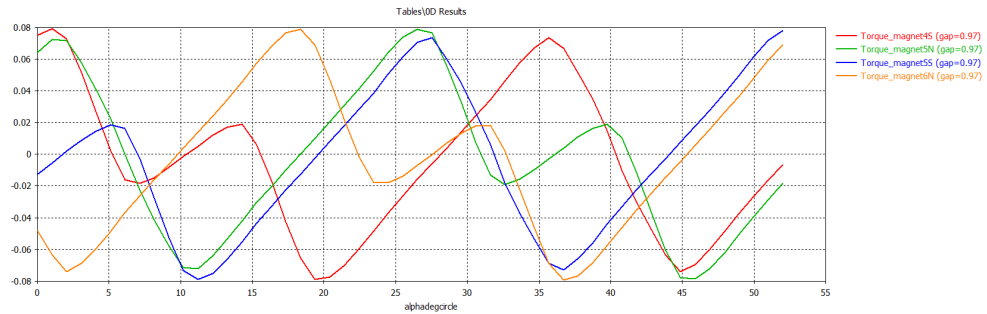


Figura 5.28: Andamento della coppia agente sul magnete 1N



(a)



(b)

Figura 5.29: Andamento della coppia agente su ognuno degli 8 magneti selezionati

(a) e (b) coincidono e si avrebbe corrispondenza anche se si illustrassero in (a) i primi 7 magneti ruotando in senso antiorario e in (b) i 7 rimanenti (numerazione di Figura 4.3).

Configurazione “*Harvey_Final_13_Mana*”

Si riporta a titolo riassuntivo in Figura 5.30 la vista frontale in sezione di “*Harvey_Final_13_Mana*” dove la distanza magneti bobine è stata aggiornata al valore

$$\text{gap} = 1 \text{ mm}$$

Il parametro **gap** è l’unico ad essere variato, tutti gli altri parametri rimangono uguali a quelli definiti in Tabella 5.1, 5.2 e 5.5.

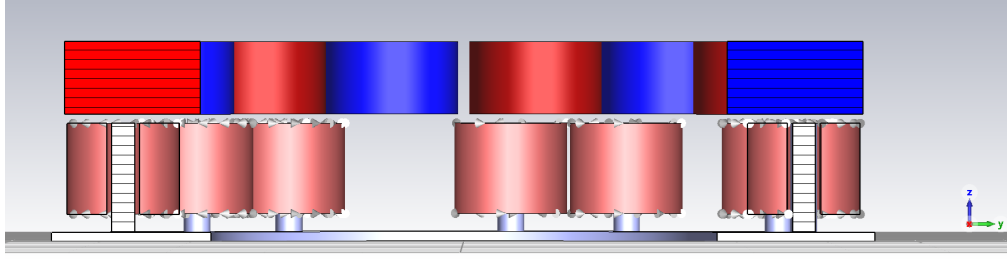


Figura 5.30: Vista in sezione frontale della configurazione 13

In Figura 5.31 si osserva la geometria del caso considerato con lo scopo di confrontarla con le successive configurazioni dove si modificheranno ulteriori parametri geometrici.

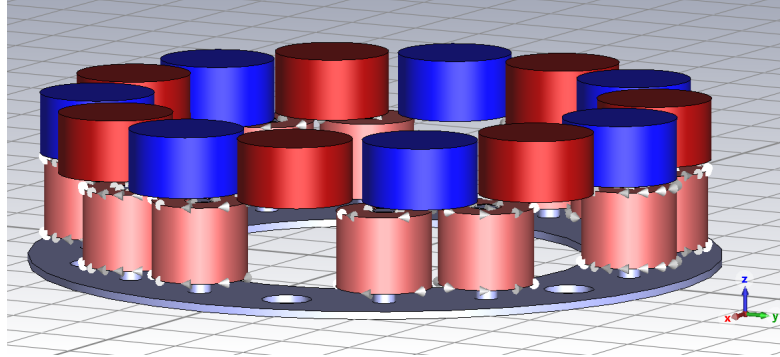


Figura 5.31: Geometria della configurazione 13 con $\text{gap} = 1 \text{ mm}$

Si parte dal modello completo “*Harvey_Final_12_Mana*” dove il valore di **gap** pari a 0.97 mm presente nella configurazione di Cavallo è stato modificato prima a 1 mm, successivamente a 1.5 mm nella versione “*Harvey_Final_13_15_Mana*” e infine a 2 mm nella versione “*Harvey_Final_13_2_Mana*”. Si riporta in Figura 5.32 il modulo dell’induzione e si osserva che avendo aumentato il **gap** da 0.97 mm a 1 mm si ha una diminuzione a 2.54 T rispetto ai 2.55 T che si avevano in configurazione 12.

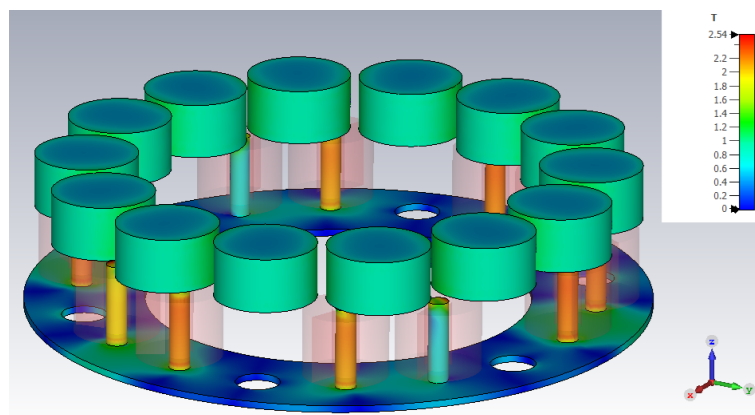


Figura 5.32: Modulo di induzione magnetica con $\text{gap} = 1 \text{ mm}$

Aumentando il valore di gap a 1.5 mm si ha un valore massimo di modulo di induzione magnetica pari a 2.43 T, con un valore di gap pari a 2 mm si ottiene un'ulteriore diminuzione del valore massimo a 2.37 T, come si può osservare da Figura 5.33 e Figura 5.34. L'incremento del valore della distanza bobina magnete causa una diminuzione dei valori di induzione.

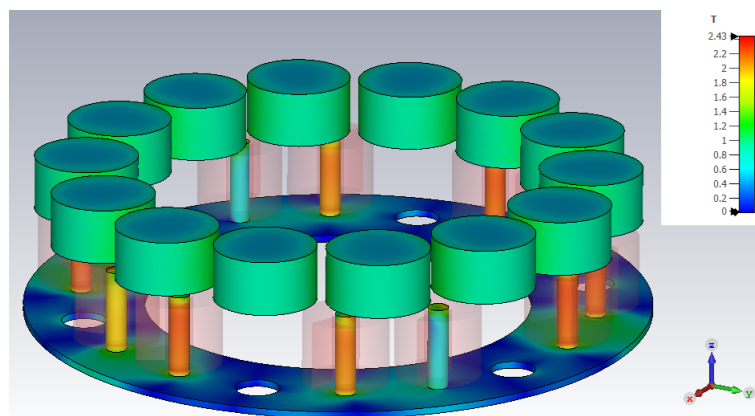


Figura 5.33: Modulo di induzione magnetica con $\text{gap} = 1.5 \text{ mm}$

Successivamente, si valutano gli andamenti dei flussi concatenati dalle bobine e delle coppie agenti sui magneti in funzione di alphadegcircle per ciascuno di questi tre gap , sono richieste dunque 3 nuove simulazioni *Par. Sweep*. A titolo di esempio, si riportano in Figura 5.35 il risultato della simulazione di flusso concatenato relativo alla bobina 1 e in Figura 5.36 la simulazione di coppia agente sul magnete 1N, ognuna per il valore di gap pari a 2 mm.

All'aumentare del gap si osserva una diminuzione di flusso concatenato da ogni bobina e di coppia agente su ciascun magnete, come ci si aspettava. Si ha una

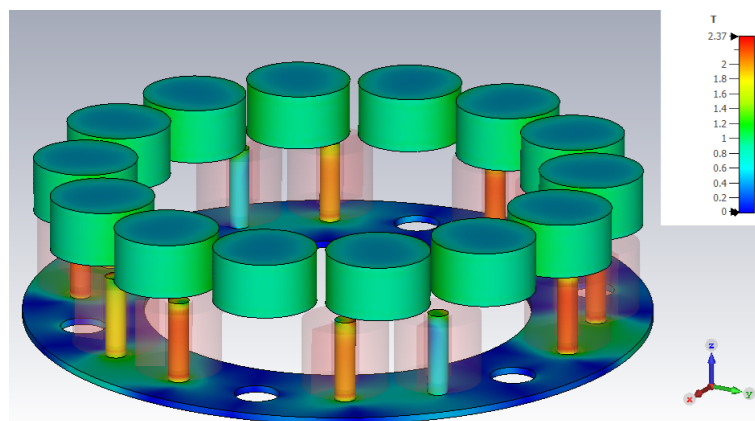


Figura 5.34: Modulo di induzione magnetica con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$

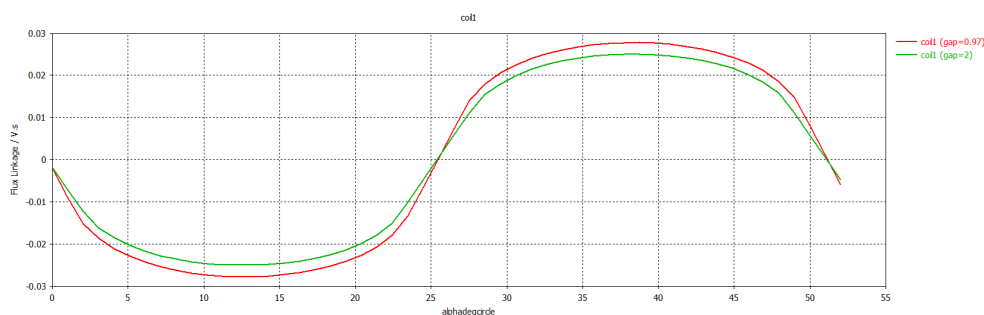


Figura 5.35: Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$

diminuzione del valore di picco di flusso concatenato al 90% del valore con gap pari a 0.97 mm. Questi risultati, insieme a quelli delle configurazioni successive, verranno approfonditi nel [Capitolo 6](#).

Configurazione “*Harvey_Final_14_Mana*”

In [Figura 5.37](#) è illustrato il nuovo modello CST di “*Harvey_Final_14_Mana*” con $\text{gap} = 1 \text{ mm}$. Si può confrontare con [Figura 5.31](#).

Utilizzando come file di riferimento l’ultima versione di “*Technical Drawings*” del 12/07/2024, si ha che la tabella di riepilogo dei valori delle quote è analoga a quella del paragrafo precedente, eccetto che per lo spessore della lamina. Si utilizza $h_{\text{lam}} = 3 \text{ mm}$ anzichè il valore considerato finora di 1 mm, dal momento che non si utilizza più la lamina in Mu-Metal.

Come nella configurazione [13](#), si realizzano tre file differenti:

- “*Harvey_Final_14_Mana*” con $\text{gap} = 1 \text{ mm}$;

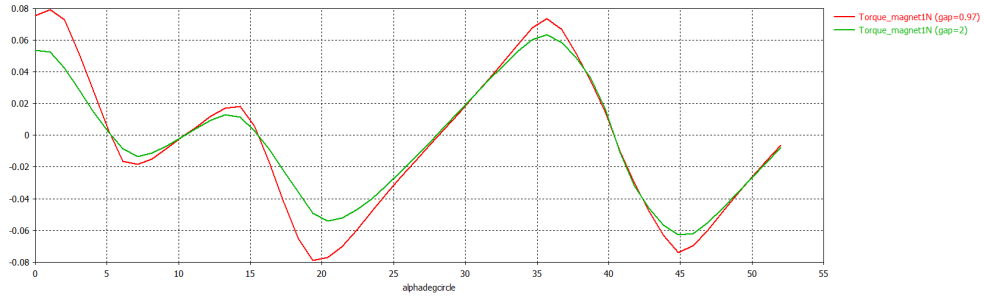


Figura 5.36: Andamento della coppia agente sul magnete 1N con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$

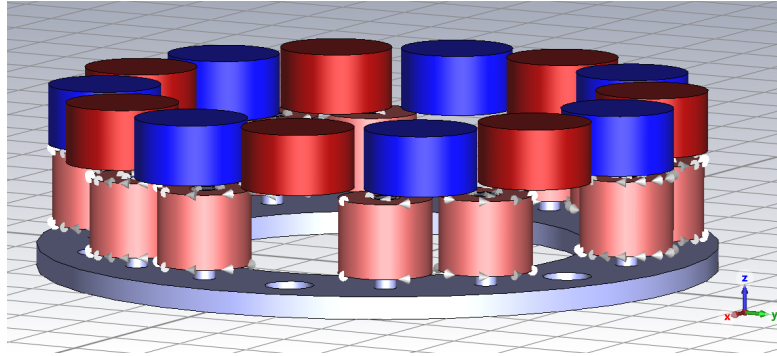


Figura 5.37: Geometria della configurazione 14 con $\text{gap} = 1 \text{ mm}$

- “*Harvey_Final_14_15_Mana*” con $\text{gap} = 1.5 \text{ mm}$;
- “*Harvey_Final_14_2_Mana*” con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$.

È possibile analizzare l'effetto dello spessore della lamina. Si imposta un confronto tra la configurazione 13 e la configurazione 14, i valori di induzione magnetica, flusso concatenato da ogni bobina e coppia agente su ciascun magnete sono all'incirca gli stessi: lo spessore della lamina non influisce particolarmente. In particolare, come nella configurazione precedente, il flusso è circa 90% del valore con $\text{gap} = 0.97 \text{ mm}$ e i tre valori massimi di modulo di induzione magnetica sono gli stessi, si riporta a titolo di esempio la Figura 5.38 con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$ da confrontare con la Figura 5.34.

Configurazione “*Harvey_Final_15_Mana*”

Si riporta in Figura 5.39 il modello CST di questa configurazione con gap impostato a 2 mm . Si confronti con Figura 5.37.

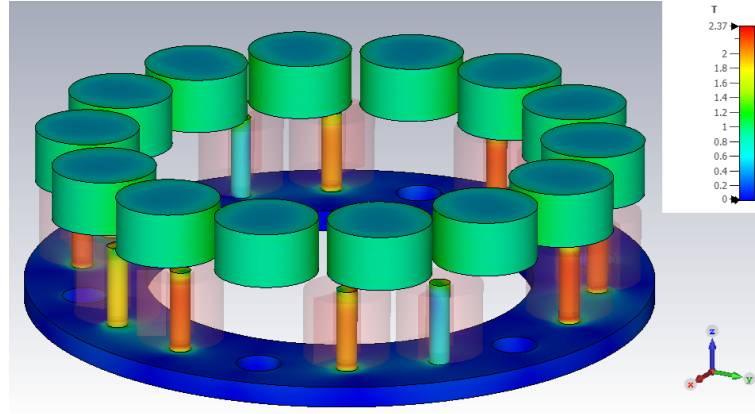


Figura 5.38: Modulo di induzione magnetica con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$

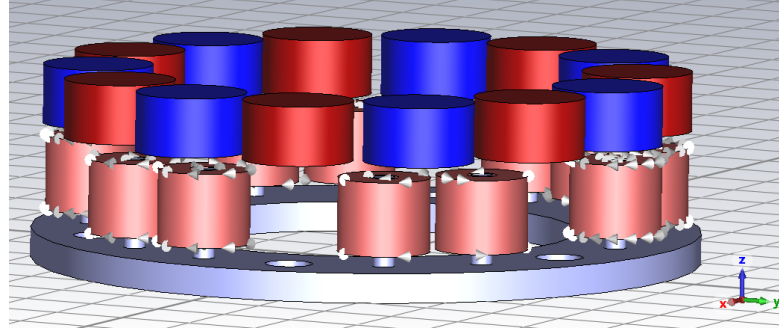


Figura 5.39: Geometria della configurazione 14 con $\text{gap} = 2 \text{ mm}$

I valori delle quote sono illustrati in Tabella 5.7 e fanno riferimento ai file “2024-HARVEY-COR FER-R01” e all’ultima versione di “*Technical Drawings*” (12/07/2024). Gli altri parametri rimangono con valori pari a quelli della Tabella 5.2 e 5.5. In particolare, come si può vedere dalla Tabella 5.7, rispetto alla configurazione 14, si modificano i valori di:

- h_{lam} (spessore lamina) da 3 a 4 mm;
- r_{ilam} (raggio interno lamina) da 28 a 28.5 mm;
- r_{forolam} (raggio foro lamina) da 3.30 a 3.25 mm.

È possibile valutare l’effetto della variazione dei tre parametri indicati sopra: si conduce un confronto tra la configurazione 14 e 15. Anche qui, in linea con le aspettative, si osserva che i valori di induzione magnetica (in Figura 5.40 riportato il caso con gap pari a 2 mm da confrontare con Figura 5.38), flusso concatenato

Tabella 5.7: Valori parametri di input con corrispondenza ai nomi utilizzati in CST

Parametro	Valore	Unità []	Parametro CST
Lamina			
Raggio interno	28.5	mm	rilam
Raggio esterno	45.5	mm	relam
Spessore	4	mm	hlam
Distanza foro origine	37.5	mm	distforolam
Raggio del foro	3.25	mm	rforolam
Distanza angolare fori	60	°	thetafori
Distanza angolare foro bobina	19.6	°	angleforolam
Bobine			
Numero spire	1250	–	Nbob
Raggio medio	4.125	mm	rcircle
Spessore radiale	4.25	mm	thr
Spessore assiale	10	mm	thz
Distanza angolare coppie bobine	60	°	thetabob
Posizione meccanica rotore	52	°	alphadegcircle
Distanza lamina bobina	2	mm	distlambob
Magneti			
Raggio magnete	7.5	mm	rmagn
Spessore assiale	8	mm	hmagn
Ordinata magnete 1N	36.5	mm	ycmagn
Induzione residua	1.2	T	Bmagn
Numero magneti	14	–	nmagn
Distanza bobina magnete	2	mm	gap

da ciascuna bobina e coppia agente su ogni magnete non variano particolarmente al variare di questi tre parametri. Come si nota da Figura 5.41, si ha nuovamente il flusso con $\text{gap} = 2$ mm pari al 90% di quello con $\text{gap} = 0.97$ mm, esattamente come nelle altre due configurazioni 13 e 14. Anche per la coppia si ottengono all'incirca gli stessi valori, come mostrato in Figura 5.42.

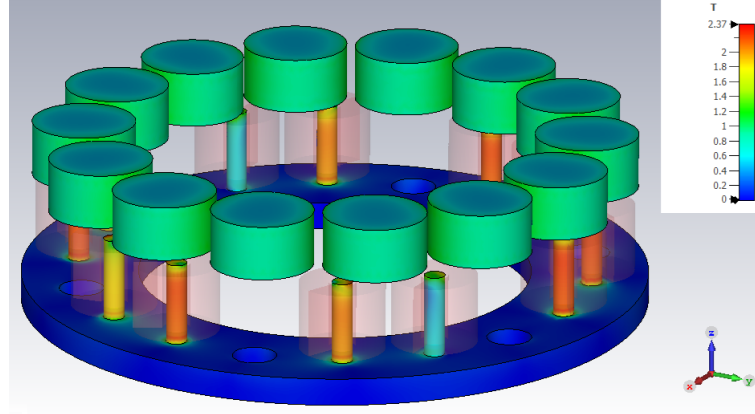


Figura 5.40: Modulo di induzione magnetica con $\text{gap} = 2$ mm

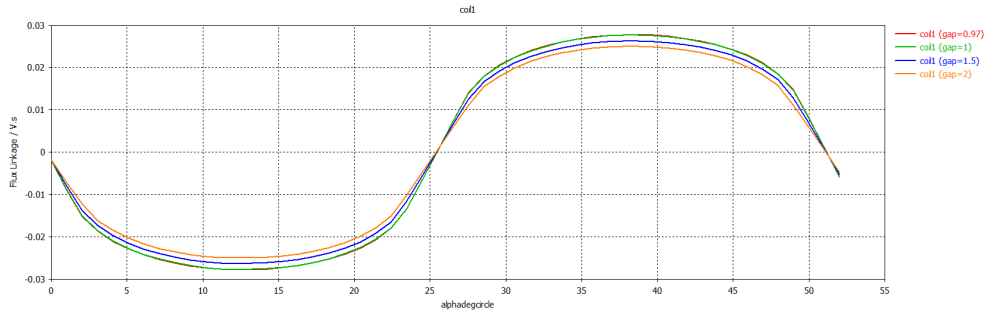


Figura 5.41: Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 per differenti valori di gap

A differenza della versione 13 e 14, al fine di poter fare confronti direttamente dal software CST, si decide di avviare le 3 simulazioni con valore di gap differente unicamente in “*Harvey_Final_15_Mana*”. Sul software CST, nella sezione *1D Plot*, è necessario modificare *X axis* da “*Run ID*” a “*Parametric*”, selezionare in *Parameter* la posizione meccanica del rotore *alphadegcircle* e infine in *Curve Set* il parametro *gap*. I risultati ottenuti si analizzeranno nel Capitolo successivo esportando i dati su un foglio di calcolo in modo da poter effettuare valutazioni analitiche, ma, come appena visto, CST è in grado di illustrare un set di andamenti in funzione di un parametro. Infatti, in Figura 5.41 e 5.42 sono rappresentati

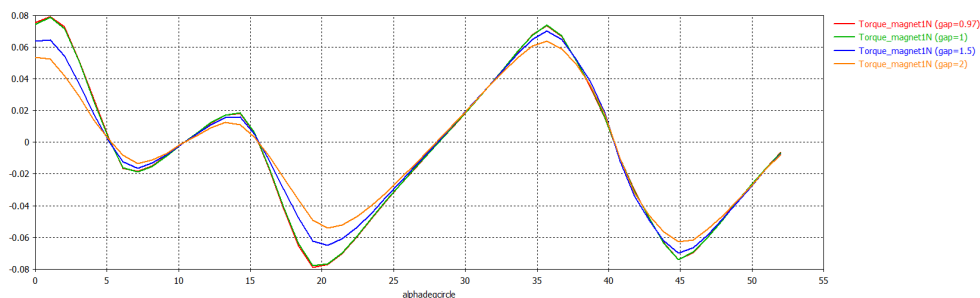


Figura 5.42: Andamento della coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di gap

rispettivamente i risultati delle simulazioni di flusso concatenato dalla bobina 1 e coppia agente sul magnete 1N in funzione del parametro posizione meccanica del rotore per i tre differenti valori di **gap**. In questo modo, già attraverso il software CST, si inizia ad osservare qualitativamente l'effetto dell'aumento di traferro: la diminuzione di flusso concatenato è accettabile e permette di ridurre la coppia agente sul singolo magnete che potrebbe portare in rotazione lo statore, si rimanda al [Capitolo 6](#) dove viene calcolata la tensione ai capi dell'avvolgimento e viene valutato l'effetto della coppia totale agente sullo statore al variare del traferro.

Configurazione “*Harvey_Final_16_Mana*”

Questa configurazione coincide con la versione [15](#) a cui si estende la *linear sweep* della posizione meccanica del rotore fino a 60° meccanici, questo perchè la coppia agente sul singolo magnete ha periodo pari a 60° meccanici e non circa 52° (7 paia poli) come il flusso concatenato dalla singola bobina. La coppia agente su ogni magnete ha periodo di 60° meccanici a causa della presenza di un foro ogni 60° e quindi, dal punto di vista di uno qualsiasi dei magneti, del ripetersi della stessa struttura di rotore una volta che viene ruotata di 60° .

In tal modo si ottengono gli andamenti di un periodo completo di coppia come si può vedere dalla [Figura 5.43](#), dove è illustrata la coppia agente sul magnete 1N per i quattro valori di gap selezionati.

Come si osserva nel [Capitolo 6](#), dapprima, si può ottenere la coppia totale agente sullo statore per l'intero periodo, inoltre, i dati di un periodo completo permettono di effettuare un'analisi di Fourier al fine di valutare quali armoniche sono contenute nel grafico di coppia agente sul singolo magnete in modo da comprendere se i profili ottenuti dal software CST possono essere coerenti con quanto succede in realtà.

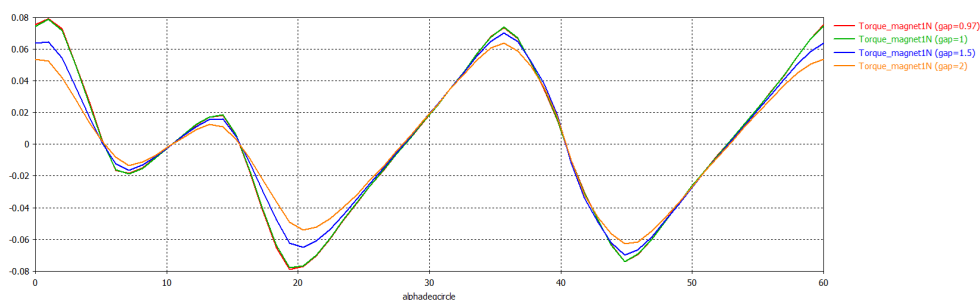


Figura 5.43: Andamento di un periodo completo di coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di gap

Configurazione “*Harvey_Final_17_Mana*”

Questa nuova configurazione è stata aggiunta a seguito dell’esito negativo della prova meccanica con **percentgap** pari a zero e **gap** pari a 2 mm. Dal momento che c’è margine di tensione generata, si opta per diminuire la lunghezza della vite in una serie di cinque simulazioni con:

- **percentgap** = 0 ;
- **percentgap** = -3 ;
- **percentgap** = -6 ;
- **percentgap** = -9 ;
- **percentgap** = -12 .

Per ognuno dei cinque casi si fissa il **gap** al valore di 1 mm. In Tabella 5.8 sono presenti i valori di lunghezza delle viti e di gap effettivo calcolati con l’Equazione (5.11) e (5.14) per ogni valore di **percentgap** impostato.

Tabella 5.8: Calcolo dei parametri delle viti nelle 5 simulazioni

percentgap	gap [mm]	lvite [mm]	realgap [mm]
0	1	12	1
-3	1	9	4
-6	1	6	7
-9	1	3	10
-12	1	0	13

Si riportano di seguito, a titolo di esempio, le Figure 5.44, 5.45 e 5.46 dove vengono illustrate tre delle cinque geometrie considerate.

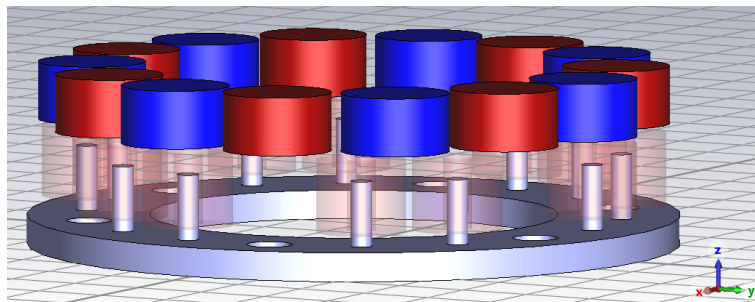


Figura 5.44: Geometria della configurazione 17 con `percentgap` = -3

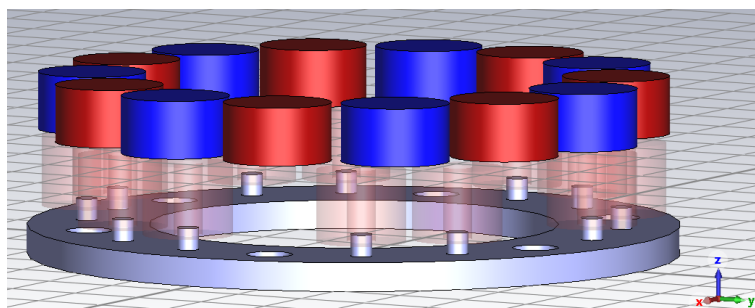


Figura 5.45: Geometria della configurazione 17 con `percentgap` = -9

Si valuta così l'effetto della lunghezza delle dodici viti (o equivalentemente del gap effettivo) sulla coppia, sulla tensione e sul modulo di induzione. In Figura 5.48 e in Figura 5.49 si rileva l'effetto di `percentgap` sulla tensione ai capi di ciascuna bobina e sulla coppia agente su ogni magnete. In accordo con le aspettative, all'aumentare di `realgap` si registra una diminuzione di tensione e coppia.

In Figura 5.47 si osserva uno dei casi più significativi di induzione con `percentgap` pari a -9, dove si ha un valore massimo pari a 1.18 T come nelle configurazioni 4 e 8 (assenza di viti) nonostante ci siano le viti con `lvite` = 3 mm. Si registra lo stesso effetto in Figura 5.48, dove si osserva che con `percentgap` pari a -9, si ha un valore di picco di flusso molto vicino a quello senza viti (`percentgap` = -12). In conclusione, dal software CST risulta che viti molto corte sono quasi come inesistenti se si ha lo scopo di incrementare induzione e flusso, l'aumento sostanziale si ha da `percentgap` -6 a 0.

Passando da `percentgap` nullo (`gap` = 1 mm) a:

- `percentgap` = -3, si ha che il nuovo flusso concatenato dalla bobina 1 è 0.817 volte quello precedente;

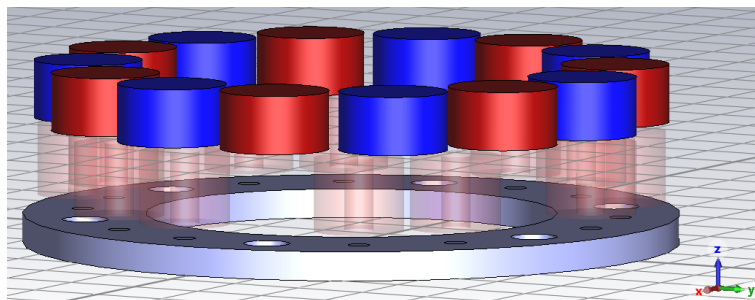


Figura 5.46: Geometria della configurazione 17 con $\text{percentgap} = -12$

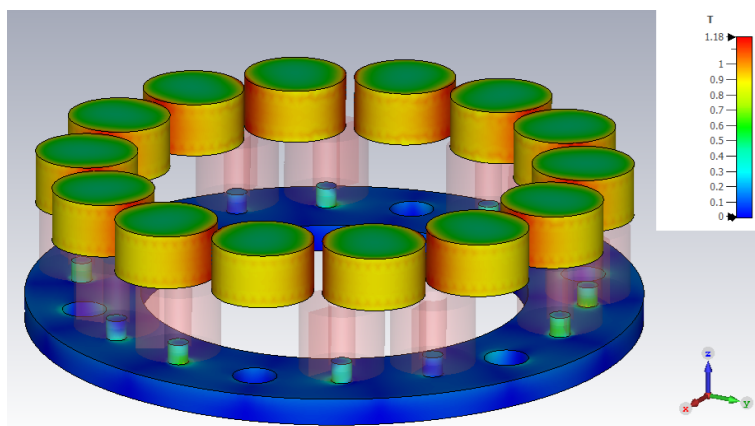


Figura 5.47: Modulo di induzione magnetica con $\text{percentgap} = -9$

- $\text{percentgap} = -6$, il flusso concatenato è 0.574 volte quello precedente;
- $\text{percentgap} = -9$, il flusso concatenato è 0.456 volte quello precedente;
- $\text{percentgap} = -12$, il flusso concatenato è 0.430 volte quello precedente.

Si osserva che la diminuzione di flusso concatenato dalla singola bobina non è lineare all'aumentare di percentgap : per lunghezze delle viti vicine ai 12 mm, al diminuire di $lvite$ il flusso diminuisce più significativamente rispetto a $lvite$ piccole. Analogamente, per $lvite$ elevate, il flusso cresce in maniera più marcata all'aumentare di $lvite$. In sintesi, le viti modificano molto il valore di flusso e di coppia quando sono lunghe e viene variata la loro lunghezza. Le viti molto corte sono approssimabili a viti di lunghezza nulla per quanto riguarda il flusso, vale lo stesso per le coppie, pertanto, conviene non abbassare troppo la lunghezza delle viti, altrimenti si ha una tensione ai capi dell'avvolgimento insufficiente (effetto non lineare) come nel caso senza viti analizzato da Cavallo e Serbu.

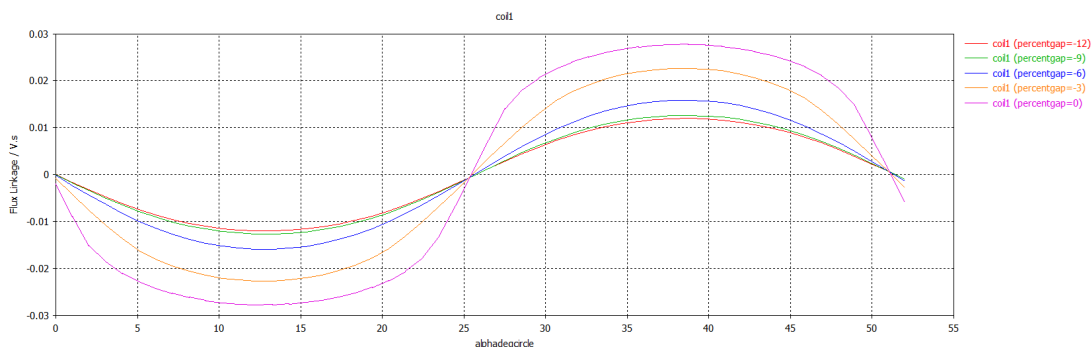


Figura 5.48: Andamento del flusso concatenato dalla bobina 1 per differenti valori di percentgap

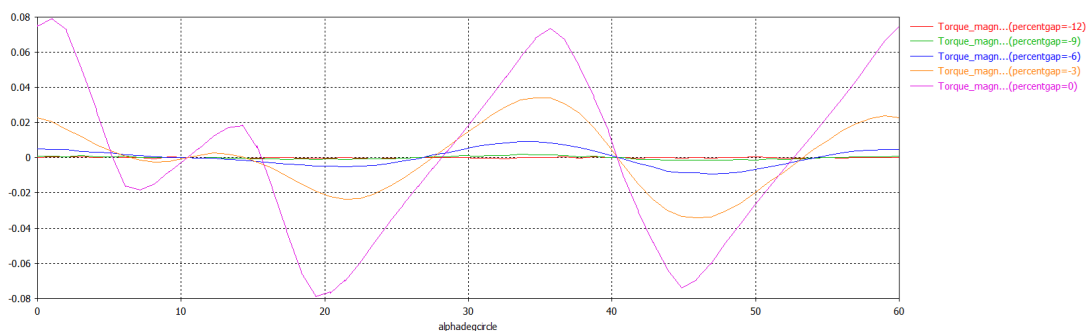


Figura 5.49: Andamento della coppia agente sul magnete 1N per differenti valori di percentgap

Le prove meccaniche corrispondenti sono state eseguite con **gap** pari a 1.5 mm (minimo **gap** disponibile) e con **lvite** pari a 10 e 8 mm (14 o 12 mm di lunghezza totale della vite a cui si sottrae lo spessore lamina **hlam** pari a 4 mm), pertanto la simulazione CST con **lvite** pari a 9mm e **gap** 1mm eseguita prima delle prove meccaniche può essere all'incirca confrontabile come diminuzione di flusso e tensione. Infatti, nella simulazione CST **realgap** ha un valore di 4 mm, nelle prove meccaniche è pari a 3.5 mm. Dalla simulazione CST si ottengono dei valori di flusso concatenato e coppia cautelativi rispetto alle prove meccaniche. Per quanto riguarda la prova meccanica con **lvite** di 10 mm, il flusso sarà circa 0.817 volte quello a **percentgap** 0 (**lvite** = 12 mm) con **gap**=1mm. Si utilizza questa analisi approssimativa dal momento che non vi è stata la possibilità di condurre altre simulazioni sul software CST, nel caso in futuro si volessero effettuare le simulazioni corrispondenti alle prove meccaniche, questi file *parametrizzati* offrono la possibilità di testare qualsiasi configurazione, basta modificare i parametri opportuni.

Configurazione “*Harvey_Final_18_Mana*”

Il grafico di coppia di Figura 5.49 richiamato nel paragrafo precedente è ricavato da questa simulazione che è estesa fino a 60° (periodo della coppia). In questo modo non si è limitati a rappresentare la coppia nei 52 gradi che è circa il periodo del flusso. Si possono formulare considerazioni analoghe alla configurazione 16: questa simulazione ha la stessa funzione.

Capitolo 6

Elaborazione risultati ottenuti dalle analisi CST

Le configurazioni di interesse sono la [15](#) e la [17](#) analizzate nel capitolo precedente, di cui si desidera elaborare i dati in uscita da CST al fine di ottenere gli andamenti di tensione indotta in ciascuna bobina, l'andamento di coppia agente sul singolo magnete e gli andamenti di tensione indotta totale nell'avvolgimento e coppia totale agente sullo statore.

In questo capitolo si elaborano i valori di flusso e coppia ottenuti da CST per ogni valore di posizione meccanica del rotore `alphadegcircle` grazie alla possibilità di esportare i dati come `.txt` e quindi di utilizzarli su un foglio di calcolo come per esempio Excel.

Per l'esportazione dei dati, anzitutto, occorre andare nella sezione *1D Plot* e impostare *X axis* su *Parametric*, immettere *Parameter* e *Curve Set*. In questa circostanza è stato impostato come parametro `alphadegcircle`, come *Curve Set* il `gap` e dalla [17](#) in poi è stato impiegato `percentgap` che obbliga ad impiegare lo stesso `gap`). Dalla simulazione [17](#) si esportano i flussi (periodo di circa 52°), mentre dalla simulazione [18](#) si esportano le coppie (periodo di 60°): ecco il motivo per cui vengono utilizzati due file CST differenti. Successivamente, occorre selezionare i grafici di coppia e di flusso interessati nelle cartelle a sinistra in *1D Results* e in *Tables* → *0D Results*, dopodichè è necessario andare nella sezione di Post-Processing di fianco a Simulation: *Post-Processing* → *Import/Export* e nella finestra che compare cliccare *Plot Data (ASCII)* nella sezione di Export. Verrà creato un file `.txt`. Per importarlo, si apre Excel, si seleziona *File* → *Apri* con l'accortezza di modificare in basso a destra in *<Tutti i file (*.*)>*, altrimenti il file `.txt` non compare. A questo punto appare l'importazione guidata del testo, al primo passaggio selezionare

Delimitato, cliccare *Avanti*, al secondo passaggio selezionare la tabulazione dal momento che i dati delle due colonne hanno questo delimitatore, cliccare *Avanti* e al passaggio 3 selezionare *Generale* in formato dati per colonna. A questo punto, se si ha Excel configurato in italiano con separatore decimale la virgola, è fondamentale selezionare *Avanzate* e da lì modificare il separatore decimale da virgola a punto, dal momento che il software CST usa il punto come separatore decimale. Inoltre, come separatore delle migliaia, è altrettanto fondamentale scegliere la casella vuota, altrimenti compaiono errori su `alphanadegcircle`. A questo punto si apre il file Excel configurato nel modo corretto, occorre salvarlo con nome come file `.xlsx` per non perdere dati. In questo modo si è in grado di manipolare i dati effettuando calcoli e tracciando grafici.

6.1 Grafici di flusso concatenato e calcolo della tensione indotta

In questa sezione si tracciano i flussi concatenati per ogni bobina, dopodiché si sommano tenendo conto della polarità al fine di ottenere il flusso concatenato dall'avvolgimento dell'*Harvey*. Infine si calcola il valore di tensione indotta nell'avvolgimento per ogni valore di `gap` a una velocità angolare fissata.

Si inizia analizzando la configurazione 15 (`percentgap = 0`) che è quella che verrà replicata nelle prove elettriche del Capitolo 9 con valore di `gap` fissato a 2 mm. In Figura 6.1 viene mostrato l'andamento del flusso concatenato dall'avvolgimento costituito dalle dodici bobine collegate in serie rispettando la polarità e viene confrontato con l'andamento di flusso concatenato dalla bobina 1. Il valore di `gap` è fissato a 2 mm.

Grazie all'utilizzo della combinazione ottimale di polarità si ottiene un flusso concatenato totale con valore di picco molto maggiore rispetto a quello della singola bobina. Con questa configurazione si ottiene un valore massimo del flusso concatenato pari a:

$$\lambda_{\max} = 0.2299 \text{ Wb}$$

Si ipotizza, in forma semplificata, che il flusso totale sia sinusoidale (considerando la sola prima armonica) e prendendo come riferimento la velocità nominale di rotazione di

$$n = 140 \text{ rpm}, \quad \omega = 14.66 \text{ rad/s}$$

il valore efficace della f.e.m. indotta sulla serie di bobine risulta:

$$V_{rms} \approx \frac{\omega pp \lambda_{\max}}{\sqrt{2}} = 16.68 \text{ V} \quad (6.1)$$

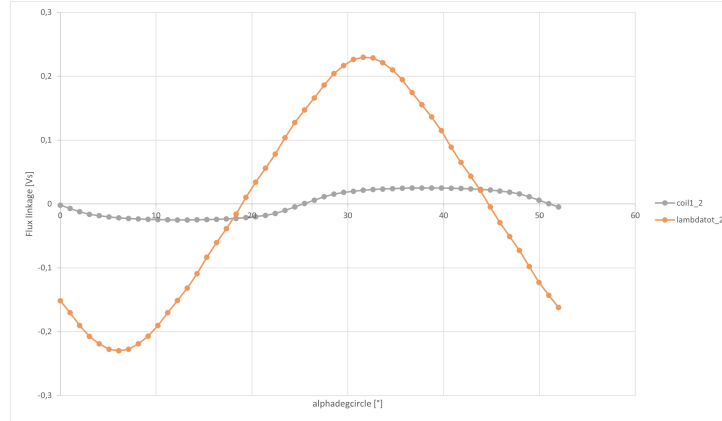


Figura 6.1: Andamento del flusso concatenato dalla bobina e dall'avvolgimento con gap pari a 2 mm

dove pp rappresenta il numero di coppie polari dei magneti, pari a 7.

L'aggiunta delle dodici viti in corrispondenza delle bobine comporta un sostanziale aumento della tensione rispetto alla versione di Cavallo^[4] dove si otteneva un valore massimo del flusso concatenato pari a:

$$\lambda_{\max} = 0.0974 \text{ Wb}$$

a cui corrisponde una V_{rms} pari a 7.07 V.

La Figura 6.2 riporta l'andamento di flusso concatenato totale per i tre valori di gap pari a 1 mm, 1.5 mm e 2 mm.

Si osserva lo stesso comportamento che si ha analizzando il flusso concatenato dalla singola bobina (Figura 5.41): all'aumentare del gap il flusso concatenato totale diminuisce.

Una volta ottenuti i grafici di flusso concatenato totale, si è in grado di calcolare il valore efficace di tensione indotta nell'avvolgimento per ogni valore di gap e per le velocità tipiche di funzionamento dell'*Harvey*. Inizialmente si utilizza l'approssimazione sinusoidale e l'equazione vista precedentemente. Tutti i valori ottenuti sono illustrati in Tabella 6.1 e verranno confrontati con i risultati delle prove elettriche nel Capitolo 9.

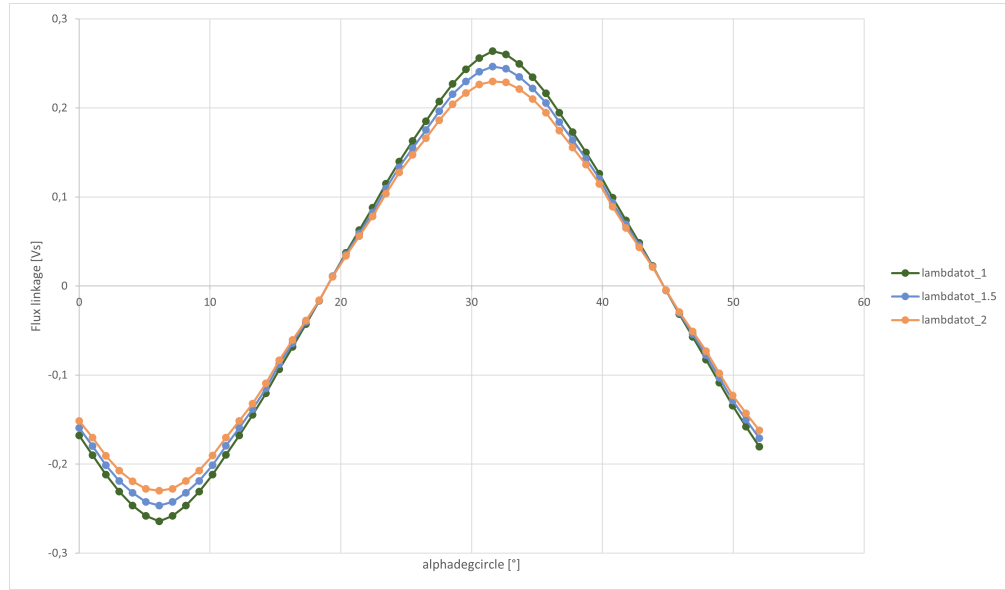


Figura 6.2: Andamento del flusso concatenato totale per differenti valori di gap (percentgap = 0)

n [rpm]	ω [rad/s]	pp	λ_{max} [Vs]	ω_e [rad/s]	V_{max} [V]	V_{rms} [V]	gap [mm]
50	5,24	7	0,2638	36,65	9,67	6,84	1
100	10,47			73,30	19,34	13,68	
140	14,66			102,63	27,08	19,15	
150	15,71			109,96	29,01	20,51	
200	20,94			146,61	38,68	27,35	
50	5,24	7	0,2464	36,65	9,03	6,39	1.5
100	10,47			73,30	18,06	12,77	
140	14,66			102,63	25,28	17,88	
150	15,71			109,96	27,09	19,16	
200	20,94			146,61	36,12	25,54	
50	5,24	7	0,2299	36,65	8,43	5,96	2
100	10,47			73,30	16,85	11,92	
140	14,66			102,63	23,59	16,68	
150	15,71			109,96	25,28	17,87	
200	20,94			146,61	33,70	23,83	

Tabella 6.1: Valori di flusso e tensione relativi alla configurazione [15](#)

Infine, attraverso la funzione *rms* di MATLAB si calcola il valore efficace del

flusso totale anzich  ipotizzare la forma d'onda sinusoidale: invece dei 16.68 V in condizioni nominali con **gap** pari a 2 mm, si ottengono 15.80 V. Questa diminuzione si verifica anche per il caso con **gap** pari a 1.5 mm e 1 mm, di conseguenza occorre ricordarsi che utilizzando l'approssimazione sinusoidale si sovrastima la tensione efficace a vuoto ai capi dell'avvolgimento dell'*Harvey*.

Si studia allo stesso modo la configurazione 17 (**gap** = 1 mm): in Figura 6.3 si visualizza l'andamento del flusso concatenato totale per i cinque valori di **percentgap**. Nella Legenda viene illustrato il valore assoluto di **percentgap**.

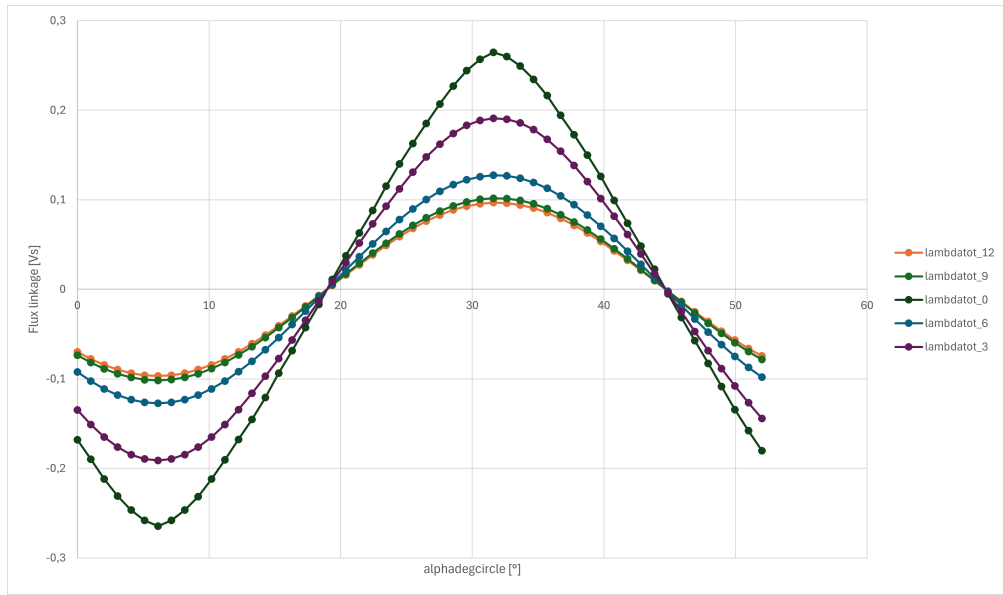


Figura 6.3: Andamento del flusso concatenato totale per differenti valori di **percentgap** (**gap** = 1 mm)

Valgono considerazioni analoghe a quelle viste nella sezione relativa alla simulazione 17: si ha lo stesso comportamento del flusso concatenato dalla singola bobina con una dipendenza non lineare da **percentgap**.

Noto il valore di picco di flusso concatenato totale, utilizzando l'approssimazione sinusoidale, si calcola nuovamente il valore efficace di tensione indotta nell'avvolgimento, questa volta per ciascun valore di **percentgap**. Tutti i valori ricavati sono riportati in Tabella 6.2 e verranno impiegati per stimare la tensione efficace a vuoto generata nella configurazione finale (Sezione 9.3).

n [rpm]	ω [rad/s]	pp	λ_{max} [Vs]	ω_e [rad/s]	V_{max} [V]	V_{rms} [V]	percentgap
50	5,24	7	0,2638	36,65	9,67	6,84	0
100	10,47			73,30	19,34	13,68	
140	14,66			102,63	27,08	19,15	
150	15,71			109,96	29,01	20,51	
200	20,94			146,61	38,68	27,35	
50	5,24	7	0,1909	36,65	7,00	4,95	-3
100	10,47			73,30	14,00	9,90	
140	14,66			102,63	19,60	13,86	
150	15,71			109,96	21,00	14,85	
200	20,94			146,61	27,99	19,79	
50	5,24	7	0,1273	36,65	4,67	3,30	-6
100	10,47			73,30	9,34	6,60	
140	14,66			102,63	13,07	9,24	
150	15,71			109,96	14,00	9,90	
200	20,94			146,61	18,67	13,20	
50	5,24	7	0,102	36,65	3,73	2,64	-9
100	10,47			73,30	7,46	5,27	
140	14,66			102,63	10,44	7,38	
150	15,71			109,96	11,19	7,91	
200	20,94			146,61	14,92	10,55	
50	5,24	7	0,0968	36,65	3,55	2,51	-12
100	10,47			73,30	7,09	5,02	
140	14,66			102,63	9,93	7,02	
150	15,71			109,96	10,64	7,52	
200	20,94			146,61	14,19	10,03	

Tabella 6.2: Valori di flusso e tensione relativi alla configurazione [17](#)

6.2 Grafici di coppia agente sui magneti e calcolo della coppia totale

Si possono estendere le stesse considerazioni discusse nella sezione precedente: anche per quanto riguarda la coppia si possono esportare i risultati di CST e ottenere gli andamenti al variare del **gap**, come si nota da Figura [6.4](#). Aumentare il traferro **realgap** comporta lo stesso effetto che si osservava per il flusso e la tensione: si registra una diminuzione di coppia. L'unica differenza, come spiegato nel capitolo precedente, è nel periodo della coppia che è pari a 60° .

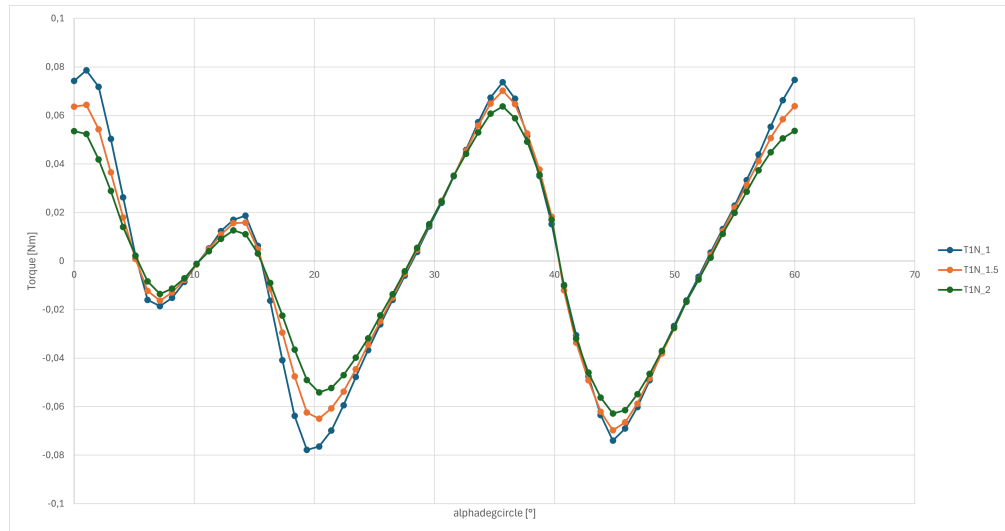


Figura 6.4: Andamento della coppia sul magnete 1N per differenti valori di gap (percentgap = 0 mm)

A titolo di esempio, si riporta in Figura 6.5 l'andamento della coppia totale agente sullo statore per il caso con gap pari a 1 mm e percentgap nullo (viti di massima lunghezza), ottenuta sommando la coppia agente su ogni magnete.

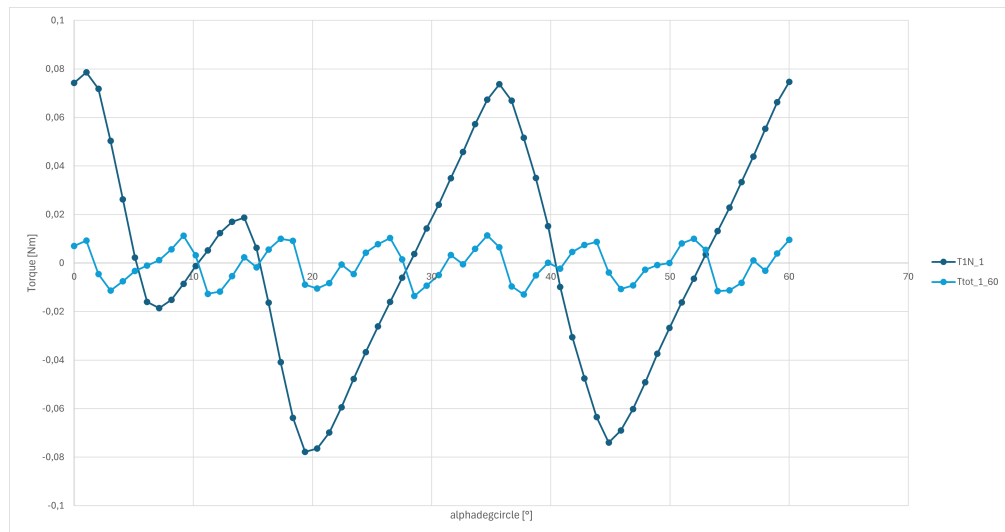


Figura 6.5: Andamento della coppia sul magnete e sullo statore con gap pari a 1 mm

Capitolo 7

Assemblaggio banco di prova

In questo capitolo vengono descritte le versioni del banco di prova inizialmente progettato e di quello successivamente installato in laboratorio. Il banco di prova è stato sviluppato per testare le prestazioni del sistema *Harvey* attraverso prove meccaniche ed elettriche che verranno descritte nel [Capitolo 9](#). L'obiettivo è stato quello di riprodurre, in un ambiente controllato di laboratorio, le condizioni operative reali, consentendo un'analisi accurata del comportamento del sistema.

7.1 Progettazione del banco di prova

Per valutare le prestazioni di *Harvey*, è stato progettato un banco prova il cui schema è riportato in [Figura 7.1](#). Esso è composto da:

- un motore primo (brushless) che simula la rotazione del disco di semina,
- un torsionmetro,
- il sistema *Harvey*.

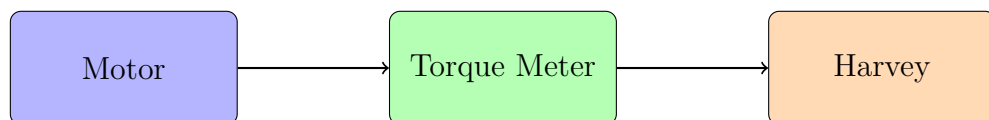


Figura 7.1: Schema concettuale del banco di prova

Per agevolare la raccolta dei dati sperimentali, come introdotto nella tesi di Serbu^[5], il banco di prova è stato progettato in due configurazioni distinte:

1. **Regime di funzionamento invertito (Configurazione *Reversed*);**

2. Regime di funzionamento normale (Configurazione *Normal*).

Tali configurazioni consentono di esplorare in maniera completa le prestazioni del sistema e di valutarne il comportamento in differenti condizioni operative.

7.1.1 Regime di funzionamento invertito (Configurazione *Reversed*)

Il regime di funzionamento invertito è stato pensato per semplificare la fase iniziale di test, mantenendo fissi i componenti elettronici e le bobine mentre vengono effettuate le misure relative alle prove elettriche. In questa configurazione, la parte gialla (normalmente statore) illustrata in Figura 7.2 viene utilizzata come rotore.

Il motore brushless che simula la rotazione del disco di semina è collegato tramite un albero al torsiometro e quindi all'*Harvey*. Tutti i componenti sono allineati per garantire la corretta trasmissione del moto. Sono stati progettati tre supporti distinti per motore, torsiometro e *Harvey*; quest'ultimo è dimensionato per fissare solamente la parte che normalmente è il rotore, lasciando libera di ruotare la parte gialla dove sono presenti i quattordici magneti, ma non le tre masse di ottone.

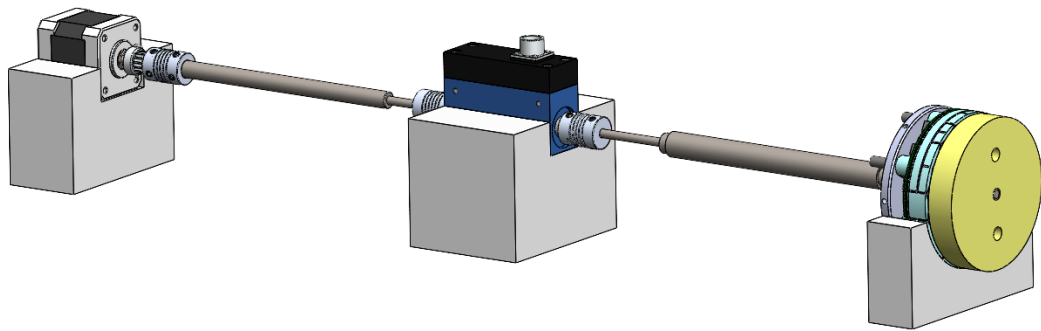


Figura 7.2: Banco prova in regime di funzionamento invertito

La vista in sezione di Figura 7.3 mostra come l'albero sia connesso direttamente alla parte gialla e attraversi la parte azzurra senza contatto meccanico, consentendo il moto relativo delle due parti. Ciò è reso possibile dal foro centrale nella parte blu e dal gap tra statore e rotore.

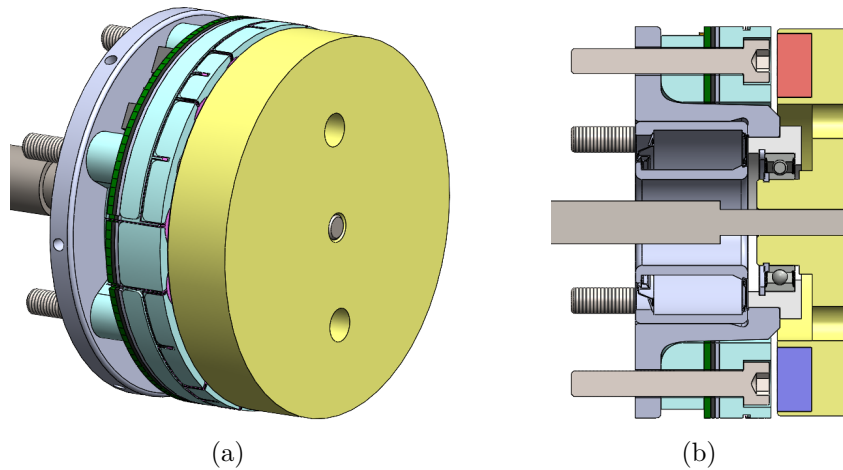


Figura 7.3: Configurazione di *Harvey* per il regime di funzionamento inverso.

Le differenze principali tra questa versione e quella finale destinata alla produzione (Figura 3.2) includono:

- rimozione delle tre masse posteriori dello statore (parte gialla) per non interferire con la rotazione;
- semplificazione della geometria per facilitare la stampa 3D;
- realizzazione di quattro fori nell'AgriHub SKF;
- aggiunta di quattro viti per migliorare l'aderenza tra mozzo (AgriHub SKF) e boccia (Figura 7.4);
- realizzazione di due fori sullo statore per facilitare il fissaggio delle viti.

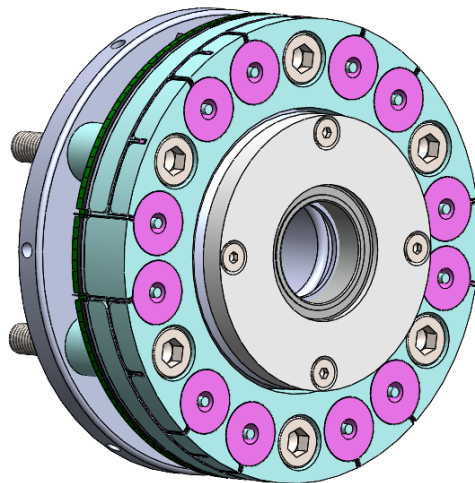


Figura 7.4: Boccia fissata al mozzo mediante quattro viti.

Sebbene queste modifiche migliorino la connessione durante la fase di test, la configurazione finale non consente modifiche alla geometria standard del SKF AgriHub S20.

7.1.2 Regime di funzionamento normale (Configurazione *Normal*)

Il regime di funzionamento normale riproduce fedelmente il principio di funzionamento reale. In questa configurazione la parte azzurra torna ad essere il rotore e quella gialla lo statore, reintroducendo le tre masse di ottone.

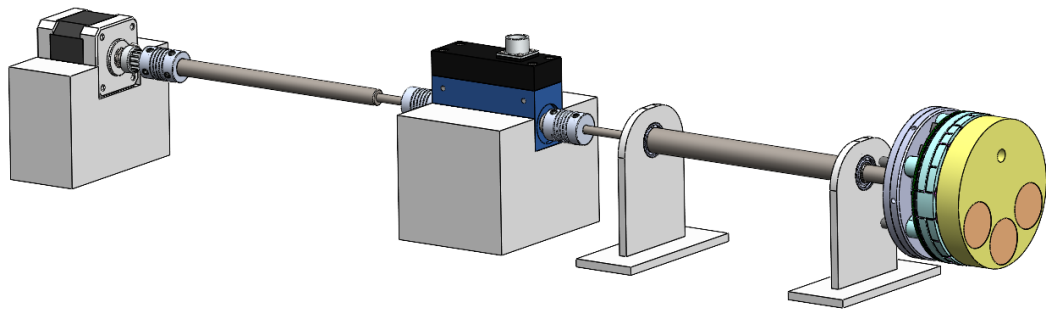


Figura 7.5: Banco prova in regime di funzionamento normale.

In questa versione l'albero è collegato a una piastra metallica fissata al mozzo e bloccata con un dado (Figura 7.6 (b)). Il supporto di *Harvey* è rimosso e sostituito da due supporti d'albero con cuscinetti, mentre i supporti per motore e torsionmetro rimangono invariati rispetto alla versione precedente.

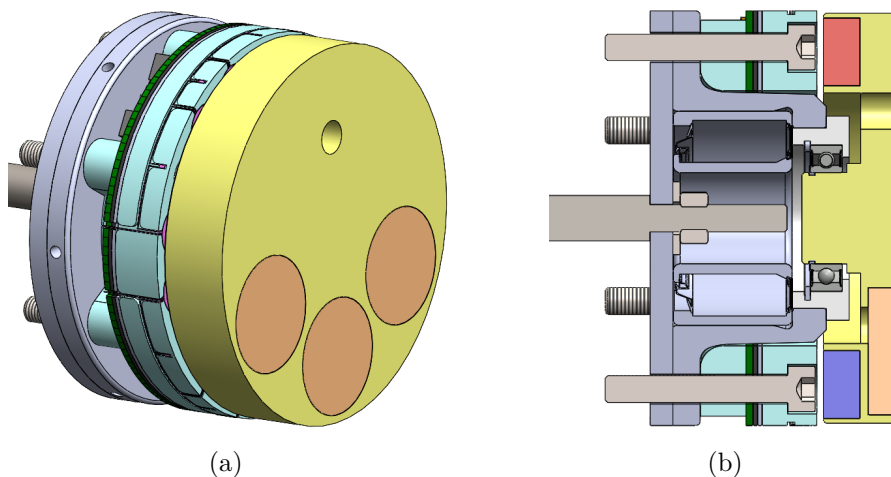


Figura 7.6: Configurazione di *Harvey* per il regime di funzionamento normale.

Per agevolare il monitoraggio del sistema, il coperchio non viene utilizzato in nessuna delle due versioni. Inoltre, lo statore mantiene ancora i due fori destinati al fissaggio tramite viti, mentre il foro filettato centrale, previsto per l'inserimento dell'albero nella configurazione precedente, è stato eliminato.

7.1.3 Costruzione del Prototipo dell'Harvey

Una volta completata la progettazione, sono stati prodotti e assemblati i componenti dell'*Harvey* per analizzarne il comportamento in condizioni reali tramite le prove sperimentali del [Capitolo 9](#).

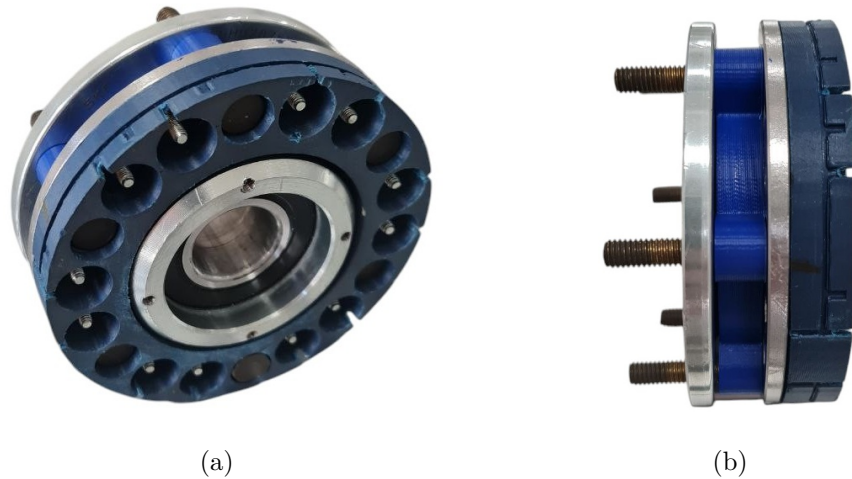


Figura 7.7: Assemblaggio dell'SKF AgriHub S20 e del case del rotore

Le due parti del rotore (distanziale e case) sono state prodotte mediante stampa 3D, una tecnologia che offre elevata flessibilità e costi ridotti, particolarmente vantaggiosa nella fase di prototipazione. Si osserva che sono state aggiunte le dodici viti in corrispondenza del luogo dove verranno montate le bobine (Figura 7.7).

I magneti permanenti (Figura 7.8 (a)) sono stati realizzati in neodimio sinterizzato, mentre le bobine (b) sono state avvolte in rame, con 1250 spire ciascuna. Entrambe le estremità del filo escono dallo stesso lato per semplificare la geometria del case.

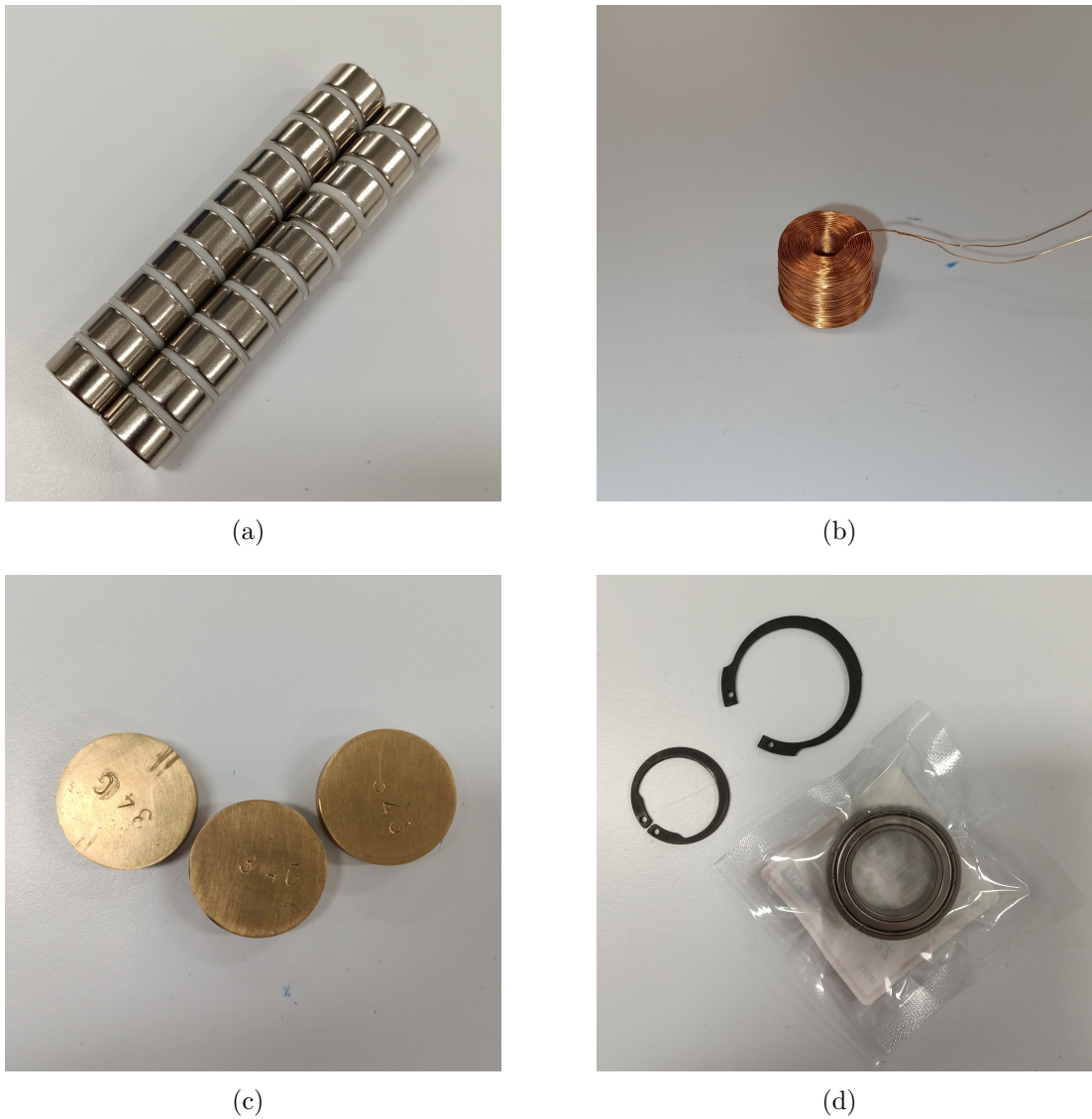


Figura 7.8: (a) Magneti permanenti, (b) bobine, (c) masse di ottone, (d) anelli di fermo e boccia.

Le masse di ottone (Figura 7.8 (c)) sono state realizzate tramite colata e pesano 34 g ciascuna. Gli anelli e la boccia (d) sono stati forniti da SKF Group.

In Figura 7.9 è mostrato l'inserimento delle bobine all'interno del case del rotore. Sono state inoltre aggiunte quattro viti nella parte centrale per incrementare la stabilità del sistema durante i test.

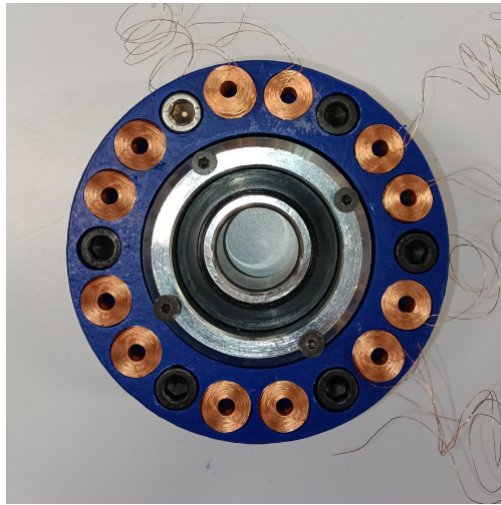


Figura 7.9: Inserimento delle bobine nel case del rotore

Nel case dello statore relativo alla configurazione *Normal* sono stati inseriti i magneti e le masse di ottone nelle rispettive cavità e praticati due fori per agevolare il fissaggio delle quattro viti citate in precedenza.



(a)



(b)

Figura 7.10: Inserimento dei magneti e delle masse di piombo nel case dello statore

Una seconda versione del banco prova relativa alla configurazione *Reversed*,

mostrata in Figura 7.11, prevede la rimozione delle masse dallo statore e il collegamento diretto al motore brushless tramite un albero, utilizzando lo statore come elemento in rotazione.



Figura 7.11: Seconda versione del banco prova con statore modificato

Le due versioni complete dell'*Harvey* e del banco prova verranno confrontate nella sezione successiva.

7.2 Struttura del banco di prova installato in laboratorio e controllo del motore primo

Dopo la fase di progettazione descritta nella Sezione 7.1, il banco di prova è stato effettivamente realizzato e installato in laboratorio. In questa sezione si riportano i dettagli del banco di prova reale, descrivendo le principali parti che lo compongono e il sistema di controllo del motore primo con i software utilizzati per il controllo di velocità e accelerazione durante le prove. Inoltre, si effettua un confronto tra le configurazioni *Normal*, *Reverse* progettate e quelle effettivamente impiegate per le prove del Capitolo 9.

La Figura 7.12 mostra la postazione del banco di prova allestita in laboratorio.



Figura 7.12: Postazione del banco di prova

Si riporta in Figura 7.13 la parte meccanica del banco di prova in assenza di *Harvey* in modo da evidenziare le principali parti. In generale, il banco è costituito da:

- Motore primo (brushless), con dati di targa 200 W, 3000 rpm;
- Driver del motore brushless, collegamento USB per configurazione e monitoraggio;
- Riduttore meccanico (rapporto 5:1);
- Giunto elastico di accoppiamento (giunto Rotex);
- Albero di trasmissione;
- Supporti meccanici con cuscinetti, basamenti per motore;
- Telaio e struttura del banco (piano di montaggio);
- Quadro elettrico;
- Modulo gateway;
- PC di controllo con software (MEXE02, Modbus Poll);
- Pannello di controllo / pulsanti di emergenza e interruttori.

Si evidenzia l'assenza del torsionometro, a differenza del banco di prova progettato nella Sezione 7.1.



Figura 7.13: Banco di prova in assenza di *Harvey*

In Tabella 7.1 si osservano i parametri principali del motore brushless e del riduttore.

Parametro	Simbolo	Valore
Potenza nominale motore	P_n	200 W
Velocità nominale motore	n_n	3000 rpm
Coppia nominale motore	T_n	0.637 Nm
Rapporto di riduzione	i	5:1
Velocità in uscita dal riduttore	n_{out}	600 rpm
Coppia in uscita dal riduttore	T_{out}	3.19 Nm
Modalità di controllo	—	ModBUS o USB (MEXE02)

Tabella 7.1: Parametri principali di motore e riduttore utilizzati nel banco di prova

Quando si controlla il motore attraverso il software MEXE02 o Modbus Poll, occorre ricordare che le velocità e le accelerazioni impostate sono quelle relative al motore, in ingresso al riduttore, pertanto la velocità e l'accelerazione dell'*Harvey* sarà 5 volte inferiore, come mostrato in Figura 7.14.

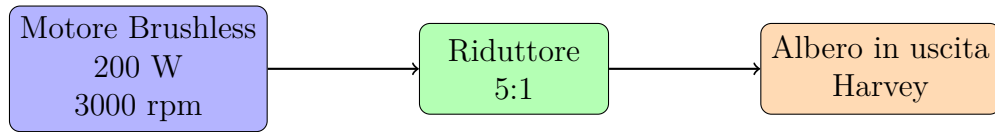


Figura 7.14: Schema concettuale del banco di prova con motore, riduttore e albero in uscita

Al fine di facilitare il confronto tra quanto progettato e quanto realizzato, in Figura 7.15 è riportato il confronto in configurazione *Normal* tra il banco di prova progettato (Figura 7.5) e quello effettivamente realizzato. Questa configurazione è utilizzata per eseguire le prove meccaniche riportate in Sezione 9.2.

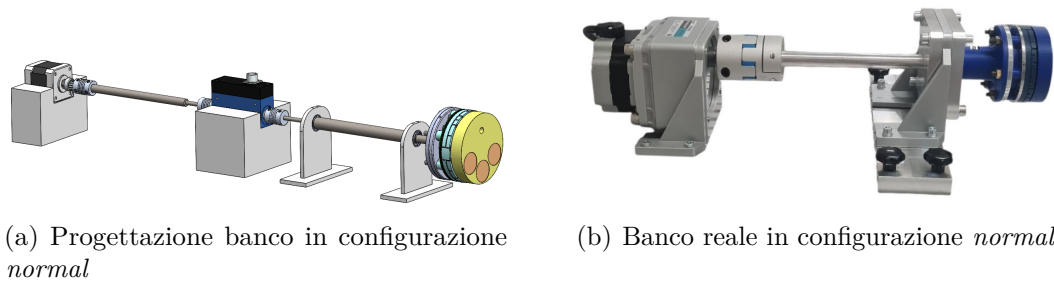


Figura 7.15: Confronto tra banco prova progettato e reale in configurazione *normal*

Come già accennato, sul banco prova non è presente il torsionmetro e per la realizzazione della prova è stato utilizzato un solo supporto meccanico con cuscinetto. In Figura 7.16 si può notare la flangia stampata per collegare l'albero al rotore.

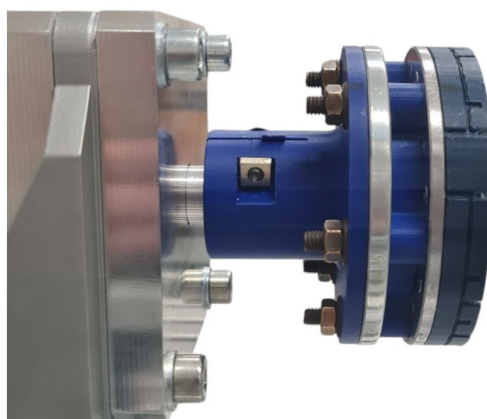


Figura 7.16: Collegamento albero-rotore configurazione *normal*

In Figura 7.17 è riportato il confronto in configurazione *Reversed* tra il banco di prova progettato (Figura 7.2) e quello effettivamente realizzato. Questa configurazione è utilizzata per eseguire le prove elettriche riportate in Sezione 9.1.

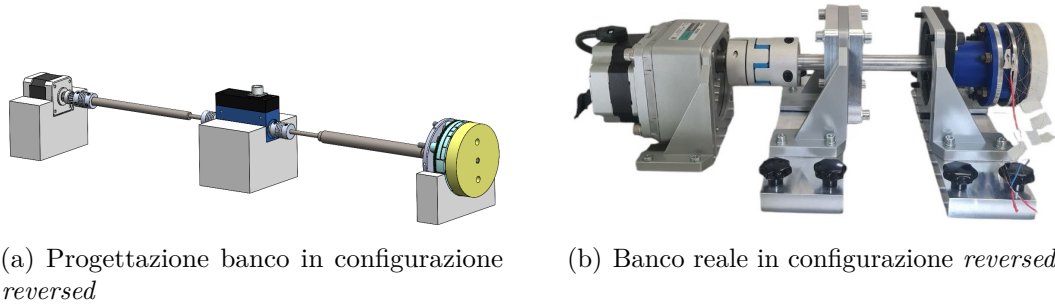


Figura 7.17: Confronto tra banco prova progettato e reale in configurazione *reversed*

Come prima, non è presente il torsionmetro. In questo caso, per la realizzazione delle prove elettriche, sono stati utilizzati entrambi i supporti meccanici con cuscinetto con l'accortezza di stampare una nuova flangia di accoppiamento che vincoli il rotore al supporto di destra. Il disegno quotato della flangia di accoppiamento viene realizzato su *Solidworks* (Figura 7.18) e mandato in stampa.

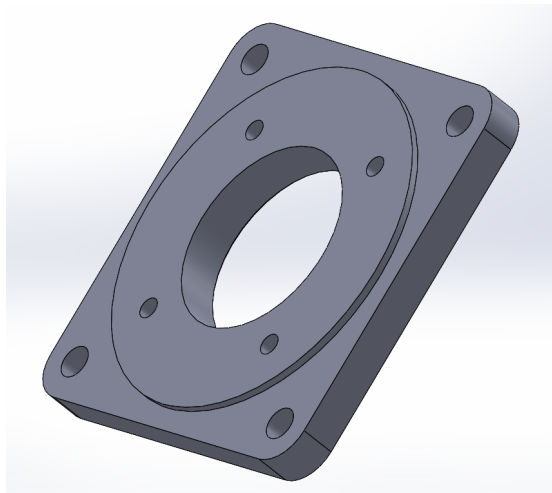


Figura 7.18: Flangia di accoppiamento realizzata per la configurazione *reverse*

Il banco di prova è completato da un sistema di controllo motore basato su azionamento brushless, il controllo della velocità e dell'accelerazione avviene tramite il software Modbus Poll o MEXE02.



Figura 7.19: Modulo driver brushless installato nel quadro elettrico

Di seguito è descritta la procedura per la connessione all’azionamento del motore in modo da controllare velocità e accelerazione per poter eseguire le prove elettriche e meccaniche del [Capitolo 9](#). Il primo passo consiste nel collegare l’azionamento alla porta USB del PC. A questo punto si utilizza il software **MEXE02 Ver.4**, si carica la configurazione “*config cezza.mxe*”, si seleziona la porta COM3 relativa all’azionamento. Si imposta su ON con l’opzione *Start monitor* e si avvia il data reading. Dopodichè, come si nota da [Figura 7.20](#), si seleziona in basso a sinistra (evidenziato in blu) (*m2*) *Remote operation*.

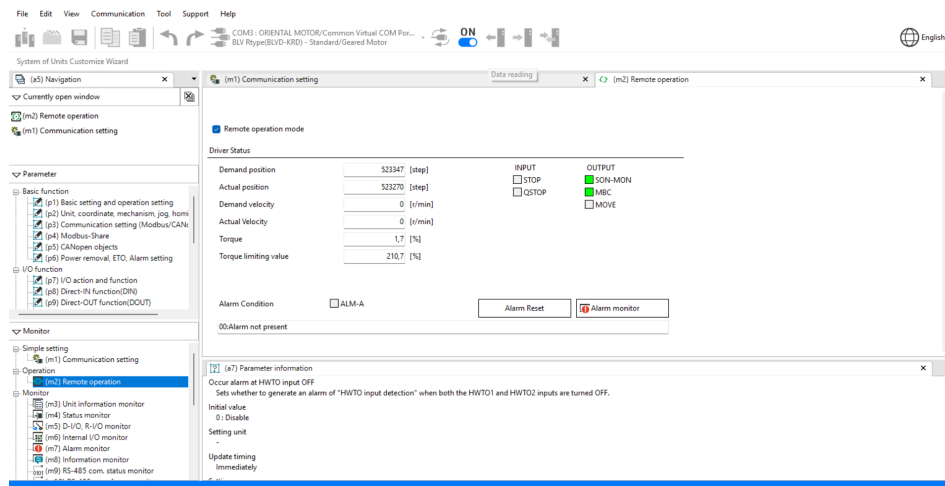


Figura 7.20: Schermata *Remote operation* del software MEXE02 Ver.4

Compare la schermata dove in cima si attiva *Remote operation mode* come da Figura 7.21.

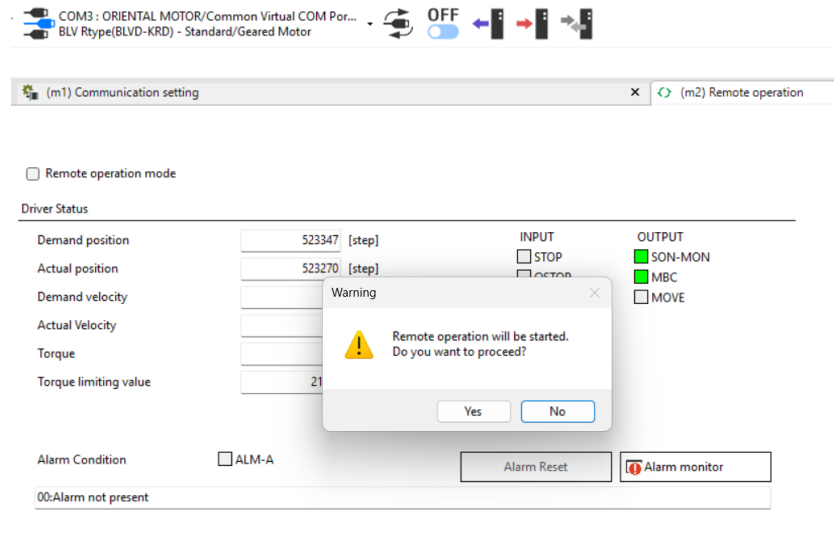


Figura 7.21: Attivazione *Remote operation mode*

D'ora in poi si riescono ad osservare i *driver status* da cui per esempio si possono leggere la velocità e la posizione. All'attivazione della modalità di *Remote Operation*, il LED del driver passa dal colore azzurro al blu e inizia a lampeggiare. Successivamente si scorre la tendina in basso fino ad arrivare alla sezione *Remote Operation*, come si osserva da Figura 7.22 e si attiva S-ON cliccando su ON.

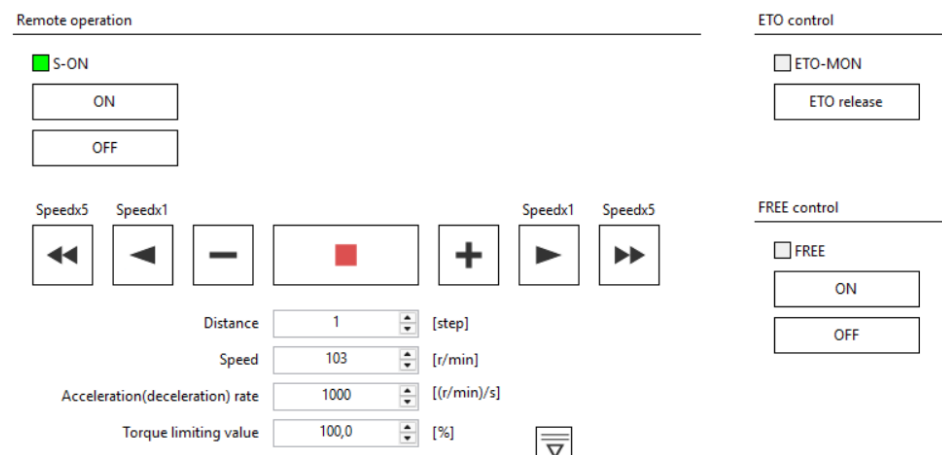


Figura 7.22: Sezione *Remote operation*

Infine, si impostano velocità e accelerazione desiderate digitando da tastiera. Mantenendo premuto *Speedx1* il motore primo inizia a girare con l'accelerazione impostata fino ad arrivare alla velocità impostata, si accende il LED verde marcia motore. Questa procedura funziona soltanto se i due LED bianchi sul pannello di controllo sono entrambi accesi, occorre ricordarsi di schiacciare il ripristino emergenza. Come già anticipato, la velocità e l'accelerazione impostate sul software sono quelle del motore a monte del riduttore, se per esempio si impostano 700 rpm, si ottengono i 140 rpm nominali sull'albero dell'*Harvey* in uscita. Mantenendo premuto l'altro pulsante *Speedx1* si ottiene la rotazione in verso opposto. É stata variata anche l'accelerazione di riferimento per verificare che con accelerazioni basse, come nel caso del disco di semina, non si massimizzi l'effetto di oscillazione dello statore in configurazione *normal*. In alternativa, è stato utilizzato il software **Modbus Poll** dove col tasto F3 si avvia la comunicazione. Da qui, si caricano il file di configurazione e il file modbus e si ottiene un funzionamento analogo a quello descritto per il software **MEXE02** con il vantaggio che non occorre mantener premuto alcun pulsante per assicurarsi che il motore primo continui a ruotare alla velocità impostata.

In conclusione, l'utilizzo dei software appena descritti permette un controllo accurato del motore e una raccolta dati affidabile durante le prove.

Capitolo 8

Progettazione dell'interfaccia elettronica (PCB)

Al fine di verificare che la tensione generata dalle dodici bobine sia sufficiente ad alimentare il trasmettitore Bluetooth sulla scheda a circuito stampato (PCB), sono state realizzate le simulazioni sul software CST ([Capitolo 5](#)) e l'elaborazione dati vista al [Capitolo 6](#). Inoltre, sono state effettuate delle prove elettriche in configurazione *reversed*, come si può osservare dal [Capitolo 9](#). Le prove sono state condotte con viti di massima lunghezza e gap pari a 2 mm. Essendo i valori di tensione risultati sufficienti, il PCB è stato mandato in produzione. Soltanto successivamente sono state effettuate le prove meccaniche in configurazione *normal* che hanno reso necessaria la modifica della lunghezza delle viti e quindi la riduzione di tensione di alimentazione della scheda, per i dettagli si rimanda alla Sezione [9.2](#). Una volta ricevuto il PCB, a circa quattro mesi dall'invio in produzione, questo è stato assemblato mediante la saldatura di tutti i componenti SMD (*Surface-Mount Device*) grazie all'impiego del software *Altium Designer*. Successivamente si sottopone il circuito a un test di funzionamento utilizzando un segnale in ingresso che riproduca la tensione alternata generata dall'harvester. A seguito della verifica di corretta operatività, il PCB risulta idoneo all'integrazione sul rotore del sistema Harvey.

Il presente capitolo illustra la parte hardware della scheda a circuito stampato (PCB) che è montata sul rotore come descritto nella Sottosezione [3.3.1](#) e in Figura [3.3](#). Inoltre, si illustra l'app Android che è stata creata per comunicare da smartphone con il trasmettitore Bluetooth (BLE).

8.1 Architettura del circuito stampato

Per garantire l'alimentazione del modulo Bluetooth, è stato sviluppato un circuito elettronico in grado di convertire la tensione alternata generata dal sistema di energy harvesting in un livello di tensione continua idoneo al funzionamento del trasmettitore. Il PCB integra le seguenti sezioni funzionali (Figura 8.1):

- **Punti di alimentazione:** connessione ai terminali della serie di bobine.
- **Convertitore AC/DC:** ponte a diodi con limitazione di tensione tramite diodi Zener.
- **Convertitore DC/DC:** convertitore Buck per fornire una tensione stabile di 3.3 V necessaria ad alimentare il trasmettitore Bluetooth.
- **Modulo Bluetooth:** trasmettitore BLE (*Bluetooth Low Energy*) per invio del segnale di operatività del disco di semina.

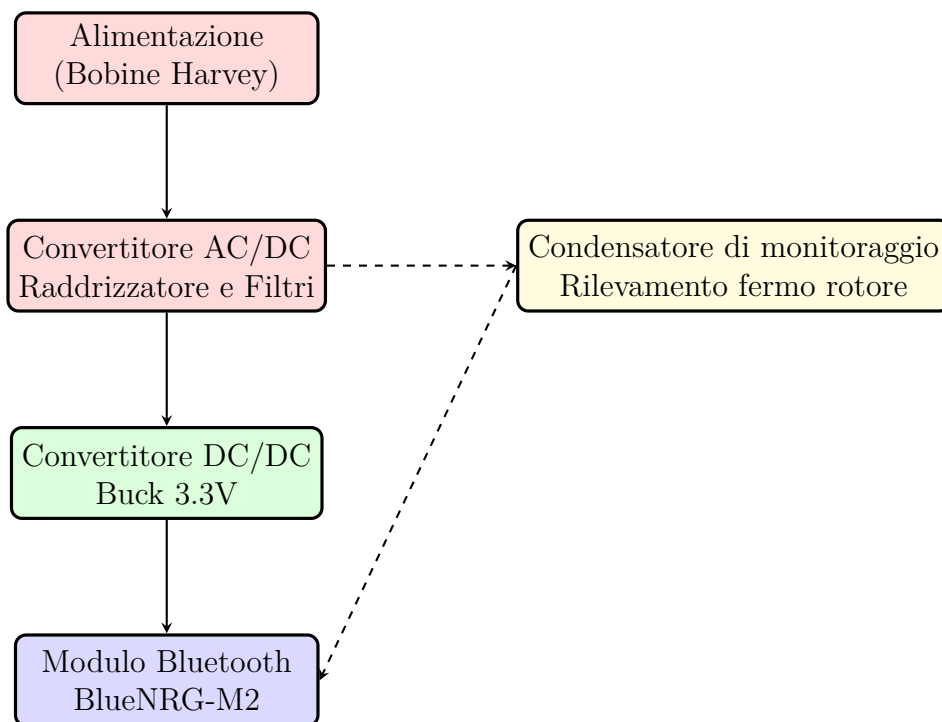


Figura 8.1: Schema a blocchi del circuito elettronico del PCB

La tensione alternata generata dalle bobine viene raddrizzata e livellata dai condensatori principali, che garantiscono una tensione continua stabile anche quando

8.2.4 Modulo Bluetooth BlueNRG-M2

Il cuore del PCB è il modulo **BlueNRG-M2SA** di STMicroelectronics (Figura 8.6), con dimensioni $11.5 \times 13.5 \times 2.0$ mm e tensione di alimentazione compresa tra 1.7 V e 3.6 V. È progettato per applicazioni *Bluetooth Low Energy* e supporta la trasmissione dati con bassi consumi.

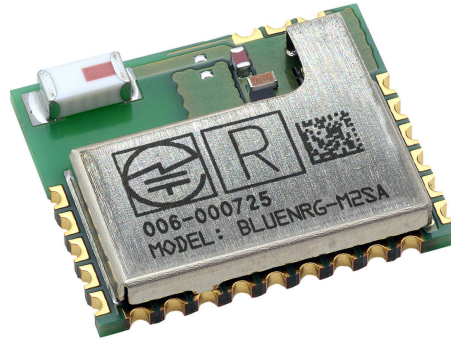


Figura 8.6: Modulo Bluetooth BlueNRG-M2SA
(fonte: STMicroelectronics)

Il trasmettitore Bluetooth ha in ingresso la tensione campionata ai capi del condensatore di piccola capacità (ADC1 e ADC2) e la tensione di alimentazione (3.3 V) fornita dal Buck (Figura 8.7).

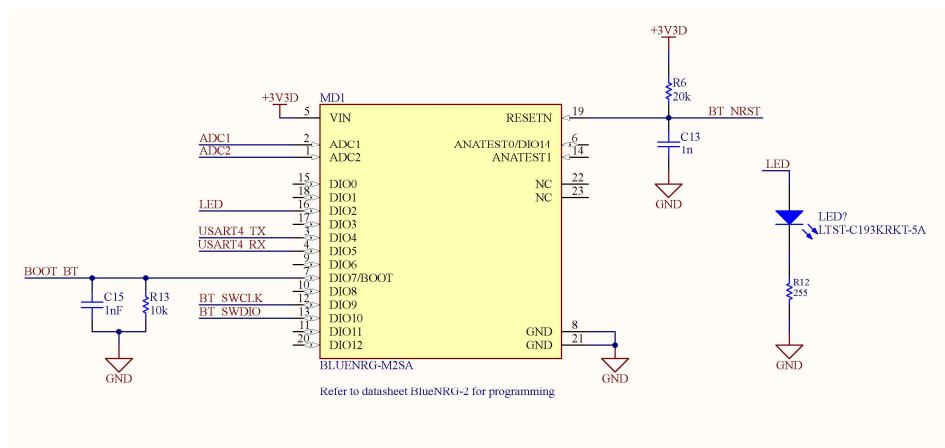


Figura 8.7: Schema del trasmettitore BLE

8.2.5 Tabella dei componenti principali (BOM)

Nella Tabella 8.1 sono riportati i principali componenti che sono stati saldati sul PCB una volta che è arrivato dalla fase di produzione. In particolare, nonostante al momento sia stato assemblato un solo PCB, ne sono stati mandati in produzione cinque, perciò di seguito si riporta la lista dei componenti relativa a tutti i PCB. Per quanto concerne i valori di resistenza, si riporta soltanto il valore tipico, ogni valore e quantità sono riportati nel progetto sul software *Altium Designer*.

8.3 Integrazione nel sistema

Il PCB deve essere progettato in modo da rientrare nel volume utile determinato dal distanziale del rotore (Sottosezione 3.3.1 e Figura 3.3). La disposizione dei componenti è mostrata in Figura 8.8 grazie all'utilizzo del software *Altium Designer*.

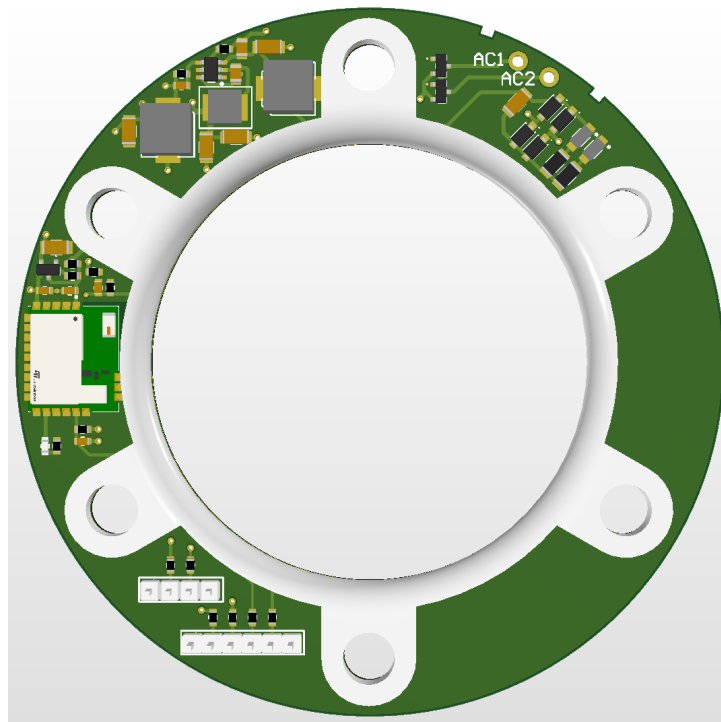


Figura 8.8: Assemblaggio PCB e distanziale

Tabella 8.1: Bill of Materials (componenti principali per l'assemblaggio di cinque PCB)

Componente	Qtà	Valore/Modello	Funzione
Connettore 6-pin	5	Header 2.54mm	Collegamento ai pin BLE
Connettore 4-pin	5	Header 2.54mm	Collegamento ai pin BLE
Diodo Schottky 2-pin	20	SOD123 (0.5A, 40V)	Conversione AC/DC alimentazione Buck
Diodo Schottky 3-pin	15	TO236AB (70mA, 70V)	Conversione AC/DC monitoraggio rotazione
Diodo Zener	10	SOD123 (17V, 0.5W)	Limitazione della tensione a 17V
Condensatore	10	0805C, X7R, 100nF	Filtraggio e riduzione del ripple
Condensatore	30	1206C, X6S, 10 μ F	Filtraggio e riduzione del ripple
Condensatore	10	0603C, X7R, 100nF	Filtraggio e riduzione del ripple
Condensatore	20	0603C, X7R, 1nF	Rilevamento fermo rotore
Condensatore elettrolitico	10	EEF1P1E680AV, 68 μ F	Filtraggio e riduzione del ripple
Led rosso	5	LTST-C193KRKT-5A	Led di segnalazione
Convertitore Buck	10	TPS563240DDCR	Convertitore DC/DC 3.3V
Induttore	5	XEL4020, 1.5 μ H	Uscita induttiva del Buck
Modulo Bluetooth	5	BlueNRG-M2SA 23-pin	Trasmissione BLE
Resistenze	Varie	tip. 10 k Ω	Varie

8.4 Verifiche prima della produzione

Prima di avviare la produzione fisica, è necessario misurare la tensione ai capi della serie di bobine e verificarne la compatibilità con il range di alimentazione del modulo Bluetooth. Solo dopo la conferma che la tensione di alimentazione DC del modulo BLE rientri nel range 1.7–3.6 V sarà possibile procedere con la

realizzazione del PCB. In seguito ai risultati soddisfacenti ottenuti dalle simulazioni CST e dalle prove elettriche del [Capitolo 9](#) (Sezione 9.1), si mandano in produzione cinque PCB.

8.5 Produzione e assemblaggio del PCB

A circa quattro mesi dall'invio in produzione sono arrivati i cinque PCB, si riporta il risultato ottenuto in [Figura 8.9](#).

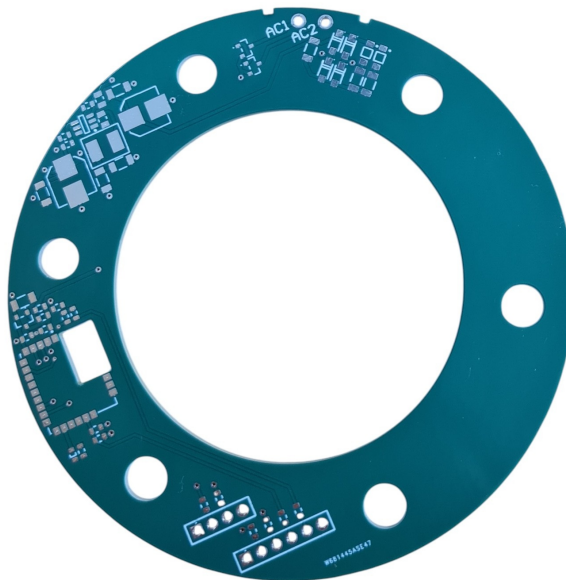


Figura 8.9: PCB finale, risultato della fase di produzione

Si procede dunque all'assemblaggio di uno dei cinque PCB, saldando uno a uno i componenti SMD della Tabella [8.1](#), si riporta in [Figura 8.10](#) il PCB quasi completo, dove mancano soltanto l'induttore in uscita dal buck e il trasmettitore Bluetooth che vengono saldati solo successivamente. Si ottiene un risultato molto simile a quello di [Figura 8.8](#), grazie a cui sarà possibile sottoporre il circuito a un test di funzionamento utilizzando un segnale in ingresso che riproduca la tensione alternata generata dall'harvester. A seguito della verifica di corretta operatività, il PCB potrà essere installato sul rotore dell'Harvey.

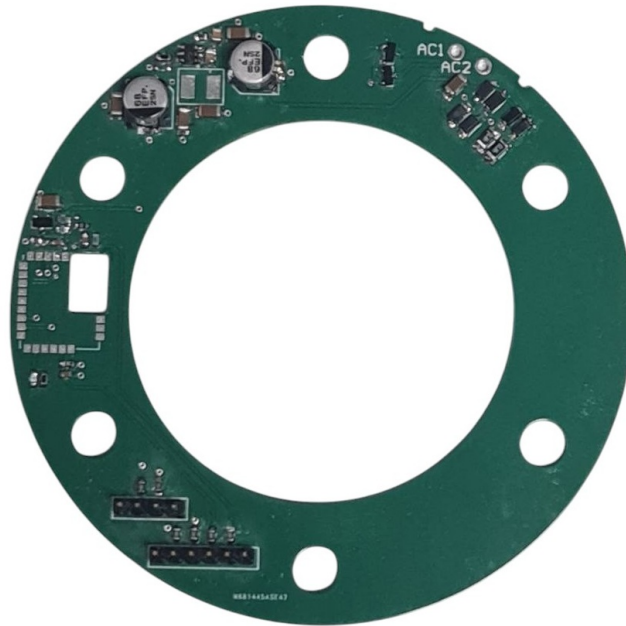


Figura 8.10: PCB dopo la saldatura della maggior parte dei componenti

8.6 App Android per comunicazione con trasmettitore BLE da smartphone

Per la realizzazione di un'applicazione Android in grado di interfacciarsi con il trasmettitore Bluetooth Low Energy (BLE) presente sul PCB, è stato utilizzato **MIT App Inventor**¹, un ambiente di sviluppo open-source creato dal Massachusetts Institute of Technology.

MIT App Inventor consente di progettare applicazioni Android in modo visuale, utilizzando un approccio a *block programming*: il programmatore può trascinare e collegare blocchi logici per definire il comportamento dell'applicazione. Uno dei principali vantaggi di questo strumento è la possibilità di testare l'app in tempo reale sul proprio smartphone: dopo aver scansionato un *QR code* generato dall'ambiente di sviluppo, l'applicazione viene eseguita direttamente sul dispositivo, permettendo di verificare immediatamente il funzionamento del progetto.

Nel caso specifico, è stata sviluppata un'app in grado di:

- effettuare la connessione via Bluetooth al trasmettitore BLE montato sul PCB, tramite la pressione di un pulsante dedicato;

¹<https://appinventor.mit.edu/>

- leggere la tensione generata dall'energy harvester in tempo reale, mediante un secondo pulsante;
- visualizzare il valore letto su un indicatore presente nell'interfaccia grafica.

Questa funzionalità consente, indirettamente, di monitorare la velocità di rotazione del disco della seminatrice: una tensione pari a zero indica che il disco si è arrestato, mentre un valore positivo conferma che la rotazione è in corso.

La Figura 8.11 mostra la schermata di progettazione (*Designer*) di MIT App Inventor relativa all'applicazione sviluppata, mentre in Figura 8.12 è riportata, a titolo di esempio, una parte dei blocchi di codice (*Blocks*) implementati per la gestione della connessione Bluetooth e della lettura del dato di tensione.

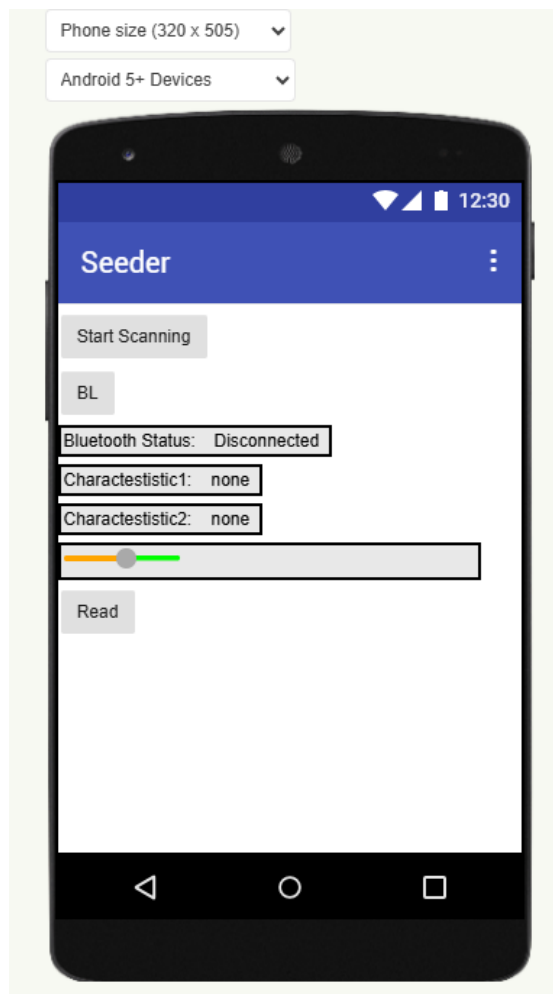


Figura 8.11: Schermata del Designer di MIT App Inventor relativa all'app sviluppata per la connessione al trasmettitore BLE e la lettura della tensione.

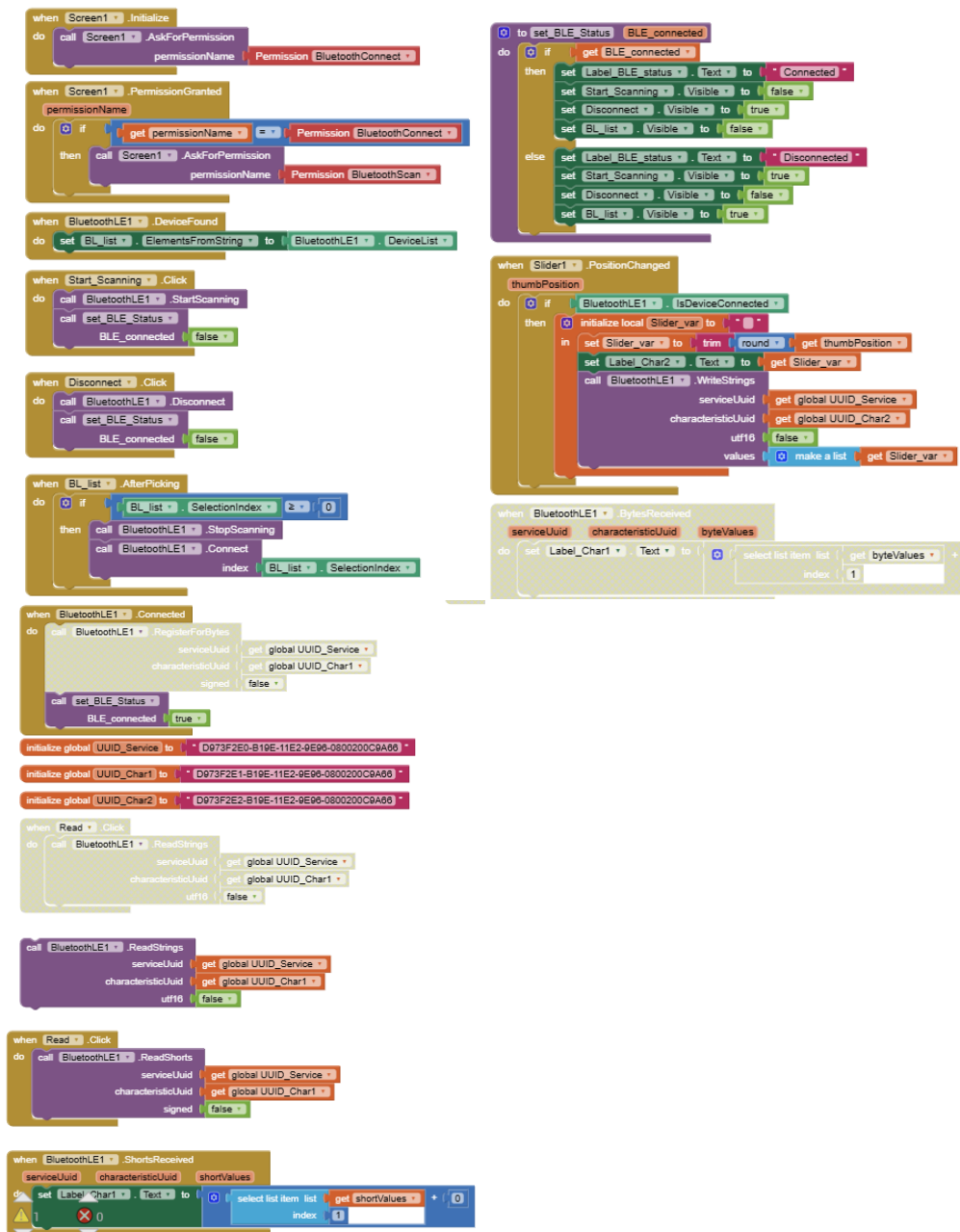


Figura 8.12: Estratto dei blocchi di codice implementati in MIT App Inventor per la connessione al trasmettitore BLE e la lettura della tensione.

Grazie a questa applicazione, è possibile verificare in maniera semplice e immediata se il disco della seminatrice sta ruotando normalmente, senza la necessità di strumentazione aggiuntiva, utilizzando esclusivamente lo smartphone.

Capitolo 9

Prove sperimentali e configurazione finale

9.1 Prove elettriche

Al fine di verificare che la tensione generata dalle dodici bobine sia sufficiente ad alimentare il trasmettitore Bluetooth presente sulla scheda a circuito stampato (PCB), è stato necessario progettare un test dove il rotore è fermo e lo statore viene messo in rotazione, a differenza di quanto avverrà nella configurazione finale. Dunque, dal momento che la forza elettromotrice è indotta dalla rotazione relativa tra rotore e statore, sono state effettuate delle prove elettriche in configurazione *Reversed* a diversi valori di velocità. La configurazione del banco di prova utilizzata per tali test è mostrata in Figura 9.1 ed è stata già presentata nella Sezione 7.2.



Figura 9.1: Configurazione *reversed* impiegata per le prove elettriche

Le prove sono state condotte adottando viti di massima lunghezza (`lvite =`

12 mm) e il valore di **gap** più elevato pari a 2 mm. Utilizzando il valore massimo di **gap** si riduce l'effetto della coppia di riluttanza agente sullo statore in modo che in configurazione *Normal* si abbia maggior probabilità che lo statore non inseguia il rotore: verrà verificata in Sezione 9.2 la stabilità dello statore tramite le prove meccaniche.

I terminali della serie di bobine sono stati collegati in serie con un amperometro, si utilizza un oscilloscopio. È stata eseguita una prova a vuoto sull'avvolgimento per differenti valori di velocità, seguita da prove con differenti carichi resistivi collegati che simulano il trasferimento di potenza verso il trasmettitore BLE, dal momento che il PCB non è ancora stato installato sul rotore.

I valori ottenuti dai test in questa configurazione sono riportati in Tabella 9.1 dove è stata evidenziata la riga con velocità nominale dell'*Harvey* e valore di resistenza più vicino al massimo trasferimento di potenza, considerando che l'avvolgimento ha una resistenza di valore pari a 355 Ω .

Tabella 9.1: Caratterizzazione elettrica con **gap** di 2 mm, lamina in ferro di 4 mm, **lvite** pari a 12 mm

Tipo di carico	Velocità [rpm]	Tensione [V_{rms}]	Corrente [mA_{rms}]	Potenza [mW]
<i>a vuoto</i>	50	4,76	–	–
	100	9,35	–	–
	140	13,06	–	–
	150	13,98	–	–
	200	18,57	–	–
$R = 600 \Omega$	50	3,01	4,94	14,6
	100	5,92	9,62	55,5
	140	8,25	13,5	109,3
	150	8,78	14,3	123,0
	200	11,77	19,7	234,5
$R = 300 \Omega$	50	2,22	7,27	15,9
	100	4,31	13,9	58,3
	140	6,03	19,5	113,9
	150	6,44	20,9	131,0
	200	8,57	27,8	231,5
$R = 150 \Omega$	50	1,44	9,46	13,4
	100	2,80	18,3	50,5
	140	3,88	25,5	97,2
	150	4,17	27,3	111,9
	200	5,55	36,3	197,4

Rispetto alle prove elettriche nella prova finale di Cavallo^[4] realizzate in assenza delle dodici viti in corrispondenza delle bobine (Tabella 9.2), si ottiene un notevole incremento dei valori di tensione e di potenza trasferita. Essendo i valori di tensione e potenza trasferita risultati sufficienti, il PCB descritto al Capitolo 8 è stato mandato in produzione.

Tabella 9.2: Caratterizzazione elettrica della prova finale di Cavallo^[4] con gap di $1 \div 1.5$ mm, lamina in Mu-Metal di 1.5 mm, in assenza di viti ($lvite = 0$ mm)

Tipo di carico	Velocità [rpm]	Tensione [V_{rms}]	Corrente [mA_{rms}]	Potenza [mW]
<i>a vuoto</i>	50	2,76	–	–
	100	4,68	–	–
	140	6,35	–	–
	150	6,83	–	–
	200	9,04	–	–
$R = 600 \Omega$	50	1,51	0,730	–
	100	2,84	4,63	12,9
	140	3,97	6,54	25,7
	150	4,25	7,00	29,4
	200	5,66	9,46	53,7
$R = 300 \Omega$	50	1,09	2,50	–
	100	2,09	6,85	14,1
	140	2,91	9,70	28,2
	150	3,11	10,4	32,6
	200	4,12	14,0	58,8
$R = 150 \Omega$	50	0,706	4,50	3,04
	100	1,35	8,93	12,0
	140	1,89	12,7	24,2
	150	2,04	13,6	27,9
	200	2,70	18,1	49,2

In particolare, si confrontano i valori efficaci delle due prove a velocità nominale, nel caso più vicino al massimo trasferimento di potenza. Nella prova in assenza di viti si ha un valore efficace di tensione pari a 2.91 V, con l’inserimento delle viti si ha una crescita a 6.03 V, un valore 2.07 volte più grande, nonostante il gap sia stato aumentato a 2 mm. In base alle simulazioni CST (Tabella 6.1), l’incremento del gap al fine di ridurre l’effetto della coppia di riluttanza sullo statore, causa una diminuzione della tensione a vuoto di circa il 13% rispetto al caso con gap di 1 mm.

Di seguito si riporta il confronto di alcuni dei valori di tensione ottenuti in

Tabella 6.1 (elaborazione risultati CST) con quelli ottenuti nelle prove elettriche. Si osserva lo scostamento tra i valori ricavati da CST e i valori misurati a vuoto nella realtà, per esempio a velocità nominale (140 rpm) si hanno 13.06 V nella prova e 16.68 V da CST. Come spiegato nella Sezione 6.1, occorre ricordare che lo scostamento effettivo è minore: eliminando l'approssimazione sinusoidale del flusso concatenato totale, si ha una tensione efficace che scende a 15.80 V. In conclusione, occorre tener presente che i risultati ottenuti da CST sovrastimano la tensione. Si potrebbe considerare una riduzione del valore efficace calcolato da CST di circa il 22% per ottenere un valore realistico a vuoto.

9.2 Prove meccaniche

Come spiegato nella Sottosezione 7.1.3, si modifica la versione dello statore e si monta la nuova flangia per passare dalla configurazione *reversed* alla *normal*, è quindi necessario reincollare i quattordici magneti sul nuovo statore. Il risultato finale, già presentato nella Sezione 7.2, è quello illustrato in Figura 9.2.



Figura 9.2: Configurazione *normal* impiegata per le prove meccaniche

L'obiettivo delle prove meccaniche è verificare la stabilità dello statore, in particolare che esso non venga trascinato dal rotore. Si cerca dunque di minimizzare le oscillazioni dovute alla coppia di riluttanza agente sui magneti.

Inizialmente si lasciano le bobine montate sul rotore e si desidera testare la configurazione su cui sono state effettuate le prove elettriche e sono stati misurati valori di tensione sufficienti al funzionamento del modulo BLE. Pertanto, si avranno viti di massima lunghezza in corrispondenza delle bobine (`percentgap` = 0), spessore della lamina in ferro di 4 mm e `gap` pari a 2 mm al fine di limitare l'effetto di coppia di riluttanza. L'avvolgimento dell'*Harvey* si collega a un resistore con valore di resistenza pari a 360 Ω vicino al punto di massimo trasferimento di potenza,

in questo modo si considera anche l'effetto della corrente negli avvolgimenti seppur minimo.

La prova meccanica in queste condizioni di funzionamento dà esito negativo: lo statore viene trascinato dal rotore, la coppia di riluttanza è elevata e le tre masse in ottone da 34 g ciascuna non sono sufficienti a garantire il moto relativo tra statore e rotore.

A questo punto, si cerca di limitare l'effetto statico di *cogging* dovuto alla presenza delle viti con la strategia dell'aumento del traferro **realgap** che può avvenire con due metodi differenti:

- Incremento del **gap**;
- Diminuzione di **lvite** attraverso la variazione di **percentgap**.

Si opta per la riduzione della lunghezza delle viti, si acquistano viti che garantiscano valori di **lvite** con un passo di 2 mm, ovvero:

- **lvite** = 12 mm (configurazione appena testata);
- **lvite** = 10 mm;
- **lvite** = 8 mm;
- **lvite** = 6 mm.

Si cerca la prima configurazione in grado di garantire oscillazioni contenute dello statore evitando il trascinamento da parte del rotore con qualsiasi velocità e accelerazione. Si ricorda che l'effetto di *cogging* è statico, ma è presente anche una coppia meccanica di attrito dipendente dalla velocità.

D'altra parte, come visto dalle simulazioni CST in Tabella 6.1 e 6.2, aumentando il traferro si ottiene una diminuzione del flusso concatenato totale e quindi del valore efficace della tensione che deve garantire il funzionamento del modulo BLE.

In tutte le prove successive il **gap** è stato mantenuto costante e pari a 1.5 mm, inoltre si procede senza bobine inserite nel rotore dell'harvey per evitare che si danneggi. Come accennato in precedenza, l'effetto di corrente nelle bobine si può ritenere trascurabile.

Si effettua la prova meccanica con **lvite** pari a 10 mm impostando diverse velocità e accelerazioni attraverso il controllo brushless presentato nella Sezione 7.2. È

stata variata anche l'accelerazione di riferimento per verificare che con accelerazioni basse (come nel caso del disco di semina) non si massimizzi l'effetto di oscillazione dello statore. Sapendo che la velocità nominale del disco di semina è pari a 140 rpm e che tipicamente si arriva alla velocità nominale in circa 4 s, allora 35 rpm/s è uno dei valori di accelerazione angolare con cui è stata eseguita la prova. Si ricorda che sul software dell'azionamento occorre inserire un valore di accelerazione 5 volte più grande a causa della presenza del riduttore nel banco di prova.

In questa prova le oscillazioni dello statore si riducono notevolmente, garantendo quasi per la totalità dei casi lo statore che non viene trascinato dal rotore. Uno dei pochissimi casi in cui lo statore insegue il rotore è quello con accelerazione pari a 20 rpm/s e velocità pari a 20 rpm (velocità e accelerazioni dell'*Harvey* a valle del riduttore). Tuttavia, occorre precisare che la rotazione dello statore insieme al rotore avviene soltanto ogni dieci secondi, diversamente lo statore oscilla.

Per minimizzare ulteriormente le oscillazioni si realizza una prova meccanica con l'vite pari a 8 mm, in questo caso si ottiene che lo statore non viene trascinato dal rotore per qualsiasi velocità e accelerazione.

In Figura 9.3 è possibile visualizzare la posizione attorno a cui lo statore oscilla, da questa posizione è possibile ricavare l'angolo per il calcolo approssimato della coppia media applicata sullo statore. Si osserva che l'angolo di equilibrio rispetto alla verticale aumenta al crescere della velocità impostata nel software di controllo.

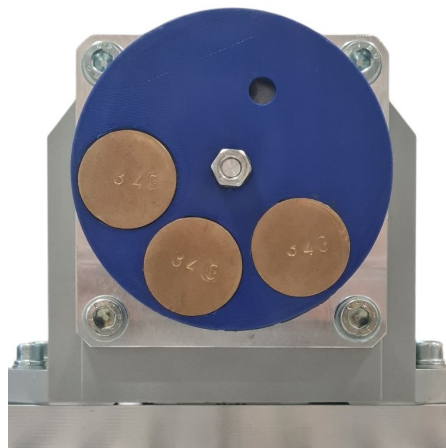


Figura 9.3: Posizione di equilibrio attorno a cui lo statore oscilla

9.3 Configurazione finale

Considerati l'esito parzialmente positivo delle prove meccaniche con `lvite` pari a 10 mm e il risultato positivo ottenuto con `lvite` pari a 8 mm, la configurazione finale prevede l'adozione di `lvite` pari a 8 mm, qualora la tensione generata dall'avvolgimento risulti sufficiente a garantire il corretto funzionamento del modulo BLE installato sul PCB; in caso contrario, si opterà per un valore intermedio tra le due configurazioni citate sopra.

Dalle prove elettriche effettuate nelle altre due configurazioni (Tabella 9.1 e 9.2) e dalle simulazioni CST realizzate al variare di `percentgap` (Tabella 6.2) si può stimare la tensione che l'*Harvey* può generare in questa configurazione finale. La configurazione 17 della Tabella 6.2 ha `gap` fissato a 1 mm. Si seleziona il valore di `percentgap` pari a -3 che è quello più vicino a `lvite`=8 mm. Alla velocità nominale (140 rpm), dal software CST, il valore efficace della tensione a vuoto risulta pari a 13.86 V. In prima approssimazione, si può ricavare un coefficiente riduttivo per ricondursi al `gap` pari a 1.5 mm della configurazione finale. Il rapporto si calcola come

$$\frac{17.88 \text{ V}}{19.15 \text{ V}} \approx 0.934$$

dove i valori utilizzati si possono osservare in Tabella 6.1.

In questo modo è possibile confrontare i valori ottenuti da CST per le tre configurazioni incontrate finora:

- Configurazione della Tabella 9.2 relativa alle prove svolte in assenza di viti, definita come (a);
- Configurazione finale, approssimata con `percentgap` pari a -3, definita come (b);
- Configurazione della Tabella 9.1, relativa alle prove con viti di massima lunghezza e `gap` pari a 2mm, definita come (c).

I valori di tensione efficace valutati da CST sono:

- (a) 7.07 V;
- (b) $13.86 \times 0.934 = 12.94 \text{ V}$ (`gap`=1.5 mm)
- (c) 16.68 V.

La configurazione finale (b) ha un valore efficace di tensione

- 0.775 volte rispetto (c);

- 1.83 volte rispetto (a).

In sostanza, l'aumento di tensione è ancora notevole rispetto al caso senza viti. Tuttavia, occorre ricordare l'approssimazione di `lvite` a 9 mm che implica una sovrastima del valore efficace. Nel caso si volessero valori efficaci di tensione corrispondenti alla configurazione finale in modo da non dover ricorrere ad approssimazioni, si può utilizzare il modello parametrizzato creato sul software CST.

Se si desidera una stima del valore efficace di tensione che si potrebbe ottenere effettuando le prove elettriche per la configurazione finale (b), in prima approssimazione, si può ricorrere al fattore 0.22 introdotto al termine della Sezione 9.1. Si ricava un valore approssimato di

$$12.94 \cdot (1 - 0.22) = 10.09 \text{ V}$$

In tal modo non occorre tornare alla configurazione *Reversed*. In conclusione, nella configurazione finale (b) si ha un aumento importante del valore efficace di tensione rispetto al valore ottenuto nella configurazione (a). Questo incremento si reputa sufficiente a garantire il funzionamento del trasmettitore Bluetooth presente sul PCB. In ogni caso, se la tensione non dovesse essere sufficiente, si potrebbe ricorrere a una soluzione intermedia con `lvite` pari a 9 mm o tornare alla configurazione con 10 mm dato che lo statore è trascinato dal rotore solo in casi particolari.

Capitolo 10

Conclusioni

Il lavoro svolto ha permesso di affrontare in modo sistematico la progettazione, la simulazione e la validazione sperimentale di un Energy Harvester elettromeccanico destinato all'alimentazione autonoma di un modulo Bluetooth Low Energy (BLE) montato sul rotore dell'*Harvey*.

A partire dalle simulazioni numeriche condotte con il software CST, si è ottenuta una prima stima della tensione generata da ciascuna bobina in diverse configurazioni di traferro e lunghezza delle viti. Tali risultati hanno guidato la progettazione delle prove sperimentali, nelle quali è stata verificata la coerenza tra modello e realtà.

Le prove elettriche condotte in configurazione *reversed* hanno mostrato che l'aggiunta delle viti in corrispondenza delle bobine incrementa significativamente la tensione e la potenza trasferita, rendendo possibile il funzionamento del modulo BLE. Al contempo, le prove meccaniche in configurazione *normal* hanno evidenziato le criticità legate al fenomeno di *cogging* per cui lo statore viene trascinato dal rotore per lunghezza delle viti elevata.

L'analisi sperimentale ha permesso di individuare un compromesso ottimale tra stabilità dello statore e prestazioni elettriche: la configurazione con **1vite** pari a 8 mm e **gap** di 1.5 mm. Tale scelta garantisce tensioni di valore sufficiente, riduce le oscillazioni dello statore e previene il suo trascinamento. In particolare, il confronto con la configurazione senza viti ha mostrato un incremento della tensione efficace di circa 1.8 volte, a conferma dell'efficacia della soluzione adottata.

In conclusione, i risultati ottenuti rappresentano un passo fondamentale verso la validazione sperimentale del sistema e forniscono indicazioni utili per attività future, tra cui la caratterizzazione dell'*Harvey* tramite PXIe, l'analisi armonica delle coppie

agenti sui magneti per una più approfondita comprensione del comportamento del sistema.

Il progetto ha quindi raggiunto l'obiettivo prefissato: validare una soluzione innovativa per l'autonomia energetica del modulo BLE, dimostrando la possibilità di un'integrazione efficace e affidabile tra simulazione, prototipazione e sperimentazione.

Ringraziamenti

A conclusione di questo lavoro di tesi, mi è doveroso ringraziare tutte le persone che con il loro instancabile supporto, hanno contribuito alla sua realizzazione.

Bibliografia

- [1] Maurizio Repetto, Claudia Barattini e Luca Dimauro. «Energy harvesting from bearings rotation in a seeding agriculture machine». In: *2023 IEEE International Workshop on Technologies for Defense and Security (TechDefense)*. IEEE. 2023, pp. 378–383 (cit. a p. [i](#)).
- [2] Yu-Jen Wang, Yu-Ti Hao e Hao-Yu Lin. «Design of a weighted-rotor energy harvester based on dynamic analysis and optimization of circular Halbach array magnetic disk». In: *Micromachines* 6.3 (2015), pp. 375–389 (cit. a p. [4](#)).
- [3] Elvio Bonisoli, Maurizio Repetto, Nicolo Manca e Alessandro Gasparini. «Electromechanical and electronic integrated harvester for shoes application». In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 22.5 (2017), pp. 1921–1932 (cit. alle pp. [4–6](#)).
- [4] Alessandro Cavallo. *Progetto energy harvester elettromeccanico*. Bachelor’s Degree Thesis. 2024 (cit. alle pp. [17](#), [22](#), [25](#), [29](#), [39](#), [57](#), [90](#)).
- [5] Andreea Serbu. «Design and experimental analysis for an electro-mechanical energy harvester for low speed applications». Tesi di laurea mag. Politecnico di Torino, 2024 (cit. alle pp. [22](#), [25](#), [39](#), [62](#)).